



Cinderela Plácido da Silva

Licenciada em Ciências de Engenharia Civil

**Comportamento de ligações adesivas
entre compósitos de FRP e elementos
estruturais de aço**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil

Orientador: Prof. Doutor Hugo Emanuel Charrinho da
Costa Biscaia, FCT/UNL

Co-orientador: Prof. Doutor Carlos Chastre Rodrigues,
FTC/UNL

Presidente: Doutora Ildi Cismasiu, Professora Auxiliar da FCT/UNL
Arguente: Doutor Manuel Gonçalves da Silva, Professor Jubilado da
FCT/UNL
Vogal: Doutor Hugo Emanuel Charrinho da Costa Biscaia, Professor
Auxiliar da FCT/UNL

Copyright Cinderela Plácido da Silva, FCT/UNL e UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Resumo

Desde de que os Polímeros Reforçados com Fibras (FRP) começaram a ser usados no reparo ou no reforço de elementos estruturais, o descolamento prematuro do compósito FRP com o substrato tem sido objecto de muitos estudos. É importante conhecer e descrever, com rigor, o comportamento completo da interface do FRP com o substrato. Inclusivé, tem-se utilizado com frequência fixações mecânicas adicionais, para demorar ou mesmo evitar o descolamento prematuro do compósito FRP com o substrato.

Não existem soluções analíticas que descrevam o comportamento completo das interfaces do FRP com o substrato. Portanto, o objetivo desta dissertação é mitigar esse desconhecimento através de uma solução teórica para descrever a ligação do FRP com o substrato com e sem ancoragem mecânica, através de um modelo de *bond-slip* exponencial que é conhecido por representar as não linearidades envolvidas no processo de descolagem do compósito FRP com o substrato. A análise completa da carga vs. deslizamento para ambos os casos (com e sem ancoragem mecânica) também é discutida nesta dissertação.

Para além disso, este trabalho também visa um estudo experimental utilizando vigas metálicas com compósitos de carbono (CFRP) ou seja, em sistema Externally Bonded Reinforcement (EBR) com e sem sistema ancorado mecânico.

Abstract

Since Fiber Reinforced Polymers (FRP) began to be used in the repair or reinforcement of structural elements, the premature separation of FRP composite substrate has been the subject of many studies because of the disadvantage it represents. The importance of knowing and describing accurately, the complete behavior of FRP interface with the substrate is required in civil engineer. Engineers are using frequently additional mechanical fixing, to delay or avoid premature detachment of FRP composite substrate.

There aren't analytical solutions that describe the complete behavior of FRP interfaces with the substrate. Therefore, the aim of this work is to mitigate this lack through a theoretical solution that describes the connection with the FRP substrate with and without mechanical anchoring, by means of a bond-slip exponential model which is known to represent the nonlinearities involved in FRP composite take off process with the substrate. Full analysis of load vs. displacement for both cases (with and without mechanical anchoring) is also discussed in this dissertation.

Furthermore, this study also aim an experimental study using metal beams with carbon composites (CFRP) representing a Externally Bonded Reinforcement system (EBR) with and without mechanical anchor system.

Palavras-chaves

Reforço estrutural;
Aderência;
CFRP;
Análise experimental;
Análise analítica;
Análise não linear.

Keywords

Structural reinforcement;
Adherence;
CFRP;
Experimental analysis;
Analytical analysis;
Nonlinear analysis.

Agradecimentos

Ao mentor deste trabalho o professor Hugo Biscaia pelo seu apoio e dedicação na procura de novas fórmulas de resolução para o trabalho em si.

Ao professor Carlos Chastre pelo apoio e disponibilidade do material que tornou a parte experimental deste trabalho possível.

A todo o pessoal de doutoramento pelo apoio e dicas disponibilizadas para um melhor funcionamento em laboratório. Mais em particular, ao André Almeida, Nuno Dinarte e Micael Inácio. Um agradecimento também ao Noel pela ajuda prática que prestou no início dos ensaios a preparar a resina.

À S&P Portugal, na pessoa do Engenheiro Filipe Dourado pela disponibilização da resina e da fibra utilizadas nos ensaios.

Ao José Gaspar e ao Jorge Silvério, pela ajuda na preparação da superfície dos provetes e na montagem de todo o equipamento necessário para os ensaios.

Aos meus colegas de curso por todo o apoio e amizade, não só ao longo da elaboração desta dissertação mas ao longo de todo o meu percurso académico, em especial à M^a Isabel Borba pela batalha em conjunto na resolução do modelo analítico proposto e na realização dos ensaios, ao Pedro Frade, ao Micael Marcelino e à Solange Cardoso, pelo companheirismo e cumplicidade na realização deste trabalho.

Um agradecimento ao Samuel Matias por me ter ajudado antes e durante todo o meu percurso académico. Um obrigada aos meus grandes amigos pelo companheirismo prestado, em especial à Daniela Inácio por ser a irmã que eu não tenho, à Sara Horta, à Diana Nascimento e à Cláudia Henriques. Um agradecimento especial ao esforço e dedicação na leitura e correção do texto por parte do Diogo Santos.

Por último, o meu mais profundo agradecimento à minha família, em particular à minha mãe pelo acompanhamento e preocupação prestada todos os dias, ao meu Pai pela educação rígida e fazer-me ver o que é a vida. Ao meu grande irmão, um obrigada pela cumplicidade que temos e sem ti eu não estaria onde estou. À minha avó, pelo acolhimento e ajuda monetária, estou bastante grata por isso e pelo apoio que dá a toda a família. Um agradecimento à Alexandra Ferreira e a sua fantástica família pelo apoio e carinho que sempre disponibilizaram-me.

Dedico este trabalho à minha família.

Índice Geral

Resumo.....	v
Abstract	vii
Palavras-chaves	ix
Keywords	ix
Agradecimentos.....	xi
Índice Geral	xiii
Índice de figuras	xvii
Índice de tabelas	xxv
Simbologia	xxvii
1. Introdução	1
1.1. Aspectos gerais.....	1
1.2. Objetivo da dissertação	4
1.3. Estruturação e organização.....	5
2. Revisão bibliográfica - ligação adesiva FRP/substrato	7
2.1. Introdução.....	7
2.2. Revisão bibliográfica.....	8
2.3. Ensaio de corte simples	8
2.4. Lei de <i>bond-slip</i>	10
2.5. Desempenho total da ligação FRP/substrato	13
2.6. Análise numérica de Ferracuti: comportamento completo da ligação sem ancoragem mecânica.....	14

2.7.	Solução analítica de Yuan e Caggiano: comportamento da ligação FRP/substrato sem ancoragem mecânica	15
2.8.	Análise numérica de Ferracuti e Viegas[34]: comportamento da ligação CFRP/substrato com ancoragem mecânica	19
2.9.	Tipos de roturas da ligação FRP/aço	21
2.10.	Equações governativas da ligação FRP/substrato	23
2.11.	Lei <i>bond-slip</i> exponencial	25
2.12.	Fatores que influenciam a ligação FRP/substrato.....	27
3.	Modelo analítico proposto.....	33
3.1.	Introdução.....	33
3.2.	Corte simples sem ancoragem mecânica	34
3.2.1.	Enquadramento teórico.....	34
3.2.2.	Carga máxima transmitida ao compósito FRP	37
3.2.3.	Curva carga vs. deslizamento	38
3.2.4.	Comprimento efetivo da ligação	39
3.2.5.	Forças no substrato.....	41
3.3.	Corte simples com ancoragem mecânica.....	43
3.3.1.	Enquadramento teórico.....	43
3.3.2.	Curva carga vs. deslizamento	45
3.3.3.	Variação do comprimento colado durante o processo de descolamento	49
3.3.4.	Força no substrato	51
4.	Programa experimental.....	53
4.1.	Equipamento e características dos materiais	53
4.2.	Viga metálica de ensaio.....	55
4.3.	Compósito de CFRP.....	55
4.4.	Adesivo.....	56
4.5.	Preparação dos materiais a ensaiar	56
4.6.	Programa experimental e instrumentação	57
5.	Resultados e discussão dos dados ensaiados	63
5.1.	Ensaio de corte simples sem ancoragem mecânica.....	63

5.1.1.	Comprimento colado superior ao comprimento efetivo	65
5.1.2.	Comprimento colado inferior ao comprimento efetivo	72
5.2.	Modos de rotura observados	82
5.3.	Ensaio de corte simples com ancoragem mecânica	84
5.3.1.	Comprimento colado superior ao comprimento efetivo	85
5.3.2.	Comprimento colado inferior ao comprimento efetivo	88
5.4.	Modos de rotura obtidos.....	91
6.	Validação do modelo analítico proposto	93
6.1.	Ensaio de corte simples sem ancoragem mecânica.....	93
6.1.1.	Lei de <i>bond-slip</i>	93
6.1.2.	Comprimento colado superior ao comprimento efetivo	95
6.1.3.	Comprimento colado inferior ao comprimento efetivo	110
6.1.4.	Forças máximas nos provetes sem ancoragem mecânica.....	123
6.2.	Ensaio de corte simples com ancoragem mecânica.....	124
6.2.1.	Comprimento colado superior ao comprimento efetivo	124
6.2.2.	Comprimento colado inferior ao comprimento efetivo	129
6.2.3.	Força máxima nos ensaios com ancoragem mecânica	133
6.3.	Comparação com outros estudos	133
6.3.1.	Trabalho experimental e numérico de Biscaia <i>et al.</i> [11].....	134
6.3.2.	Trabalho numérico de Viegas.....	135
6.3.3.	Trabalho experimental e numérico de Ferracuti.....	137
6.4.	Análise do pós-colapso da ligação CFRP/aço	139
6.4.1.	Modelo analítico não linear sem ancoragem mecânica	140
7.	Conclusões e desenvolvimentos futuros.....	143
7.1.	Conclusões	143
7.2.	Futuros desenvolvimentos.....	144
	Bibliografia	145

Índice de figuras

Figura 1.1 - Evolução da utilização da fibra de carbono, em função do seu preço, da sua produção e campo de aplicação [3].	2
Figura 1.2 – Esquema dos modos de rotura da ligação Aço/FRP	4
Figura 2.1 – Ensaio de corte simples sem ancoragem mecânica.	9
Figura 2.2 – Ensaio de corte simples com amarração mecânica (a) ensaios de corte simples (b) ensaio de Ferracuti [22].	9
Figura 2.3 - Modelos da lei <i>bond-slip</i> [45].	12
Figura 2.4 - Diferença de comportamento de descolamento para as curvas <i>bond-slip</i> não lineares com e sem um deslizamento final [46].	13
Figura 2.5 – Secção dos provetes ensaiados por Ferracuti (a) e esboço dos ensaios experimentais realizados por Ferracuti (b) [22].	14
Figura 2.6 – Resultados numéricos e experimentais obtidos por Ferracuti [22]	15
Figura 2.7 – Esboço do sistema de ensaio de Yuan et al [39].	16
Figura 2.8 – Modelo <i>bond-slip</i> do tipo bilinear usado nos estudos analíticos de Yuan et al. [39].	16
Figura 2.9 – Modelo analítico da ligação do FRP/betão para força vs. deslizamento adimensional, Yuan et al. [39].	17
Figura 2.10 - Curvas carga vs. deslizamento (a) diferentes comprimentos colados, Yuan <i>et al.</i> [39]	18
Figura 2.11 – Curvas carga vs. deslizamento (b) vários módulos de rigidez do FRP, Yuan <i>et al.</i> [39]	19
Figura 2.12 – Identificação dos ramos na curva força vs. deslizamento dos ensaios de corte simples com ancoragem mecânica, com comprimento colado de 200 mm.	20
Figura 2.13 – Modelo discreto para o sistema de ancoragem com ancoragem mecânica na extremidade, Viegas [34]	20
Figura 2.14 – Comparação de modelos para comprimento colados de 50 mm e 250 mm: (a) $L_b < L_{eff}$, (b) $L_b > L_{eff}$ Viegas [34].	21

Figura 2.15 – Esboço dos ensaios de corte simples realizados por Xia e Teng [27].....	21
Figura 2.16 – Modos de fratura existentes [45].....	22
Figura 2.17 – Tipos de roturas da ligação FRP/aço obtidas pelos ensaios de corte simples realizados por Xia e Teng [27] adoptado	22
Figura 2.18 - Esquema de um teste de corte simples sem ancoragem mecânica [46].....	24
Figura 2.19 – Curvas extensão vs. tensão dos diferentes tipos de resina usadas por T.Yu et al. [62]	29
Figura 2.20 – Curva força vs. deslizamento na extremidade carregada da ligação FRP/aço feita por T.Yu et al. [62].....	30
Figura 3.1 - Determinação do comprimento efetivo da ligação a partir de: (a) curva carga máxima vs. comprimento colados e (b) curvas força vs deslizamento da interface entre o CFRP e o aço... 40	
Figura 3.2 – Relação entre os deslizamentos da extremidade livre com a extremidade carregada	41
Figura 3.3 – Diferença analítica dos ensaios de corte simples com ancoragem mecânica para diferentes comprimentos colados: $L_b < L_{eff}$ ($L_b=50$ mm) e $L_b > L_{eff}$ ($L_b = 200$ mm). Parâmetros: $B = 13,71 \text{ mm}^{-1}$; $A = 0.0038$; $E_f = 159 \text{ GPa}$ e $A_f = 14 \text{ mm}^2$	47
Figura 3.4 – Modelo analítico de um ensaio de corte simples com ancoragem mecânica para $L_b > L_{eff}$, valores dos parâmetros: $B = 13,71 \text{ mm}^{-1}$; $A = 0,38\%$; $E_f = 159 \text{ GPa}$; $A_f = 14 \text{ mm}^2$ e $L_b = 200$ mm.....	48
Figura 3.5 - F_{db} / F_{max} vs. $L_b \tau / L_{eff}$ relação ao longo do processo de descolamento da interface do FRP com o aço assumindo um modelo <i>bond-slip</i> bilinear [19] e o modelo <i>bond-slip</i> exponencial utilizados no método teórico proposto.	50
Figura 4.1 – Alçado do ensaio de corte simples experimental em Autocad 2012.....	54
Figura 4.2 – Esboço geral do equipamento usado nos ensaios experimentais de corte simples, autocad 2012	55
Figura 4.3 – Tratamento da superfície metálica com jato de areia.....	56
Figura 4.4 – Preparação do adesivo (S&P S220)	57
Figura 4.5 – Colocação da resina epoxídica S&P 220 e do compósito de CFRP	57
Figura 4.6 – Macaco hidráulico, transdutor de pressão e cunhas posicionadas na gaiola de aço... 58	
Figura 4.7 – Posição dos extensômetros e dos transdutores de deslocamento relativamente ao ensaio S/Anc_Lb150_01	59
Figura 4.8 – Organização do equipamento e material para a realização do ensaio corte simples sem amarração mecânica.....	61
Figura 4.9 – Organização do equipamento e material para a realização do ensaio corte simples com amarração mecânica.	62
Figura 5.1 – (a) Ensaio de corte simples com $L_b = 200$ mm (5 extensômetros e 3 transdutores de deslocamento); Curvas experimentais com comprimento colado 200 mm (b) curva extensão vs. deslizamento (c) curva força vs. deslizamento; (d) curva tensão de aderência vs. deslizamento ...	66

Figura 5.2 - Ensaio de corte simples com L_b de 175mm: (a) Lb175_01 - 4 extensômetros e 2 transdutores de deslocamento, (b) Lb175_02 - 4 extensômetros e 2 transdutores de deslocamento	67
Figura 5.3 – Ensaio de corte simples sem ancoragem mecânica (a) Curvas de extensão vs. deslizamento S/Anc_Lb175_01; (b) Curvas de extensão vs. deslizamento S/Anc_Lb175_02; (c) Curvas de força vs. deslizamento $L_b = 175$ mm.....	68
Figura 5.4 - Curvas de tensão de aderência vs. deslizamento (a) S/Anc_Lb175_01 (b) S/Anc_Lb175_02	69
Figura 5.5 – (a) Ensaio de corte simples para comprimento colado de 150 mm, S/Anc_Lb150_01, 4 extensômetros e 2 LVDT; Curvas de extensão vs. deslizamento: (b) S/Anc_Lb150_01 (c) S/Anc_Lb150_02	70
Figura 5.6 - Curva força vs. deslizamento, comparação dos dois ensaios com comprimento colado de 150 mm.....	71
Figura 5.7 – Curvas de tensão de aderência vs. deslizamento (a) S/Anc_Lb150_01 (b) S/Anc_Lb150_01.....	72
Figura 5.8 – Ensaio de corte simples sem ancoragem mecânica com L_b de 100mm, S/Anc_Lb100_02, 3 extensômetros e 2 defletômetros.....	73
Figura 5.9 - (a) Curva de extensão vs. deslizamento S/Anc_Lb100_01 (b) Curva de extensão vs. deslizamento S/Anc_Lb100_02; (c) Curva força vs. deslizamento, comparação dos dois ensaios com comprimento colado de 100mm.	74
Figura 5.10 - Curvas de tensão de aderência vs. deslizamento (a) S/Anc_Lb100_01 (b) S/Anc_Lb100_02	75
Figura 5.11 - Ensaio de corte simples para um comprimento colado de 75mm: (a) S/Anc_Lb75_01 - 3 extensômetros e 2 defletômetros, (b) S/Anc_Lb75_02 - 3 extensômetros e 2 defletômetros.....	75
Figura 5.12 - (a) Curvas de extensão vs. deslizamento S/Anc_Lb75_01; (b) Curvas de extensão vs. deslizamento S/Anc_Lb75_01; (c) Curva força vs. deslizamento, comparação dos dois ensaios com comprimento colado de 75mm.	76
Figura 5.13 - Curvas de tensão de aderência vs. deslizamento (a) S/Anc_Lb75_01 (b) S/Anc_Lb75_02	77
Figura 5.14 - Ensaio de corte simples com comprimento colado de 50mm: (a) S/Anc_Lb50_01 - 3 extensômetros e 2 LVDT, (b) S/Anc_Lb50_02 - 3 extensômetros e 2 LVDT na horizontais e 1 LVDT na vertical (c) S/Anc_Lb50_03 – 3 extensômetros e 2 LVDT	78
Figura 5.15 - Curvas de extensão vs. deslizamento com comprimento colado de 50mm (a) S/Anc_Lb50_01 (b) S/Anc_Lb50_02 (c) S/Anc_Lb50_03.....	79
Figura 5.16 - Curva força vs. deslizamento, comparação dos dois ensaios com comprimento colado de 50 mm.	80

Figura 5.17 - Curvas de tensão de aderência vs. deslizamento com comprimento colado 50 mm (a) S/Anc_Lb50_01 (b) S/Anc_Lb50_02 (c) S/Anc_Lb50_03.....	81
Figura 5.18 – Modos de rotura obtidas experimentalmente para comprimentos colados superiores ao comprimento efetivo para ensaios de corte simples sem ancoragem mecânica	82
Figura 5.19 – Modos de rotura obtidas experimentalmente para comprimentos colados inferiores ao comprimento efetivo para ensaio de corte simples sem ancoragem mecânica.	83
Figura 5.20 - Ensaio de corte simples com ancoragem mecânica com comprimento colado de 200 mm (a) C/Anc_Lb200_01 (b) C/Anc_Lb200_02.....	85
Figura 5.21 – Curvas extensão vs. deslizamento ensaio de corte simples com ancoragem mecânica com L_b 200mm (a) C/Anc_Lb200_01 (b) C/Anc_Lb200_02.....	86
Figura 5.22 – Curvas força vs. deslizamento ensaio de corte simples com ancoragem mecânica, L_b 200 mm.....	87
Figura 5.23 – Curvas de tensão de aderência vs. deslizamento ensaio de corte simples com ancoragem mecânica, $L_b = 200$ mm (a) C/Anc_Lb200_01 (b) C/Anc_Lb200_02.....	88
Figura 5.24 – Ensaio de corte simples com ancoragem mecânica com comprimento colado de 50 mm (a) C/Anc_Lb50_01 (b) C/Anc_Lb50_02.....	88
Figura 5.25 – Curvas extensão vs. deslizamento ensaio de corte simples com ancoragem mecânica com comprimento colado de 50 mm (a) C/Anc_Lb50_01 (b) C/Anc_Lb50_02	89
Figura 5.26 – Curvas força vs. deslizamento (a) C/Anc_Lb50_01 (b) C/Anc_Lb50_02 e curva de tensão de aderência vs. deslizamento (c) C/Anc_Lb50_01 (d) C/Anc_Lb50_02	90
Figura 5.27 – Modos de rotura obtidas experimentalmente para os ensaios de corte simples com ancoragem mecânica.	91
Figura 6.1 – Lei de <i>bond-slip</i> média e área experimental dos ensaios de corte simples	95
Figura 6.2 – Ensaio de corte simples com ancoragem mecânica para comprimento colado 200mm (a) curvas extensão vs. deslizamento teórica e experimentais (b) curvas força vs. deslizamento teórica e experimental	96
Figura 6.3 – Curvas tensão de aderência vs. deslizamento teórica e experimentais para ensaio de corte simples sem ancoragem mecânica, L_b 200mm	97
Figura 6.4 – Rotura adesiva do aço com a resina, ensaio de corte simples sem ancoragem mecânica com comprimento colado 200mm.	98
Figura 6.5 – Comprimento colado 200 mm, ensaio de corte simples sem ancoragem mecânica (a) curva tensão de aderência vs. deslizamento (b) curva força vs. deslizamento	98
Figura 6.6 – Distribuição de deslizamentos, extensões e tensões e ao longo do comprimento colado de 200 mm	99
Figura 6.7 – Força no substrato ao longo do comprimento colado de 200 mm	101
Figura 6.8 - Curvas teórica e experimental extensão vs. deslizamento para o ensaio de corte simples sem ancoragem mecânica (a) S/Anc_Lb175_01 (b) S/Anc_Lb175_01	102

Figura 6.9 - Curva força vs. deslizamento teórica e experimental para ensaio de corte simples sem ancoragem mecânica para comprimento colado de 175mm.....	102
Figura 6.10 - Curvas de tensão de aderência vs. deslizamento teórica e experimentais (a) S/Anc_Lb175_01 (b) S/Anc_Lb175_01	103
Figura 6.11 - Comprimento colado 175 mm, ensaio de corte simples sem ancoragem mecânica (a) curva tensão de aderência vs. deslizamento (b) curva força vs. deslizamento	104
Figura 6.12 - Distribuição de deslizamentos, extensões e tensões ao longo do comprimento colado de 175 m.....	105
Figura 6.13 – Curvas extensão vs. deslizamento teórica e experimental para ensaio de corte simples sem ancoragem mecânica (a) comprimento colado 150 mm 1º ensaio (b) comprimento colado 150 mm 2º ensaio	106
Figura 6.14 – Curva teórica e experimental força vs. deslizamento para o ensaio de corte simples sem ancoragem mecânica com comprimento colado de 150mm.	107
Figura 6.15 – Curvas de tensão de aderência vs. deslizamento teórica e experimentais (a) S/Anc_Lb150_01 (b) S/Anc_Lb150_02	107
Figura 6.16 - Comprimento colado 150 mm, ensaio de corte simples sem ancoragem mecânica (a) curva tensão de aderência vs. deslizamento (b) curva força vs. deslizamento	108
Figura 6.17 - Distribuição de deslizamentos, extensões e tensões ao longo do comprimento colado de 150 mm.....	109
Figura 6.18 - Curvas extensão vs. deslizamento teórica e experimentais para ensaio de corte simples sem ancoragem mecânica (a) comprimento colado 100 mm 1º ensaio (b) comprimento colado 100 mm 2º ensaio	110
Figura 6.19 - Curva força vs. deslizamento teórica e experimental para ensaio de corte simples sem ancoragem mecânica para comprimento colado de 100mm	111
Figura 6.20 - Curvas de tensão de aderência vs. deslizamento teórica e experimentais (a) S/Anc_Lb100_01 (b) S/Anc_Lb100_02	112
Figura 6.21 - Ensaio de corte simples sem ancoragem mecânica comprimento colado 100 mm, (a) curva tensão de aderência vs. deslizamento (b) curva força vs. deslizamento	112
Figura 6.22 - Distribuição de deslizamentos, extensões e tensões e ao longo do comprimento colado de 100 mm	113
Figura 6.23 - Curvas extensão vs. deslizamento teórica e experimentais para ensaio de corte simples sem ancoragem mecânica (a) S/Anc_Lb75_01 (b) S/Anc_Lb75_02.....	114
Figura 6.24 - Curva força vs. deslizamento teórica e experimental para ensaio de corte simples sem ancoragem mecânica para comprimento colado de 75 mm	115
Figura 6.25 - Curvas de tensão de aderência vs. deslizamento teórica e experimentais (a) S/Anc_Lb75_01 (b) S/Anc_Lb75_02	115

Figura 6.26 - Ensaio de corte simples sem ancoragem mecânica comprimento colado 75 mm, (a) curva tensão de aderência vs. deslizamento (b) curva força vs. deslizamento	116
Figura 6.27 - Distribuição de deslizamentos, extensões e tensões e ao longo do comprimento colado de 75 mm	117
Figura 6.28 - Curvas extensão vs. deslizamento teórica e experimentais para ensaio de corte simples sem ancoragem mecânica (a) S/Anc_Lb50_01 (b) S/Anc_Lb50_02 (c) S/Anc_Lb50_03	118
Figura 6.29 - Curva força vs. deslizamento teórica e experimental para ensaio de corte simples sem ancoragem mecânica para comprimento colado de 50 mm	119
Figura 6.30 - Curvas de tensão de aderência vs. deslizamento teórica e experimentais (a) S/Anc_Lb50_01 (b) S/Anc_Lb50_02 (c) S/Anc_Lb50_03.....	120
Figura 6.31 - Ensaio de corte simples sem ancoragem mecânica comprimento colado 50 mm, (a) curva tensão de aderência vs. deslizamento (b) curva força vs. deslizamento	121
Figura 6.32 - Distribuição de deslizamentos, extensões e tensões e ao longo do comprimento colado 50 mm.....	122
Figura 6.33 – Curva força máxima vs. comprimento colado do compósito CFRP.....	123
Figura 6.34 – Curvas extensão vs. deslizamento do ensaio de corte simples com ancoragem mecânica com comprimento colado 200 mm comparação com o modelo analítico (a) C/Anc_Lb200_01 (b) C/Anc_Lb200_02.....	125
Figura 6.35 - Curvas força vs. deslizamento do ensaio de corte simples com ancoragem mecânica com comprimento colado 200 mm comparação com o modelo analítico (a) C/Anc_Lb200_01 (b) C/Anc_Lb200_02.....	126
Figura 6.36 – Curvas tensão de aderência vs. deslizamento do ensaio de corte simples com ancoragem mecânica com comprimento colado 200 mm comparação com o modelo analítico (a) C/Anc_Lb200_01 (b) C/Anc_Lb200_02.....	126
Figura 6.37 - Comprimento colado 200 mm, ensaio de corte simples com ancoragem mecânica (a) curva tensão de aderência vs. deslizamento (b) curva força vs. deslizamento	127
Figura 6.38 - Distribuição de deslizamentos, extensões e tensões e ao longo do comprimento colado 200 mm.....	128
Figura 6.39 – Curvas extensão vs. deslizamento do ensaio de corte simples com ancoragem mecânica com comprimento colado 50 mm comparação com o modelo analítico (a) C/Anc_Lb50_01 (b) C/Anc_Lb50_02.....	129
Figura 6.40 – Curvas força vs. deslizamento do ensaio de corte simples com ancoragem mecânica com comprimento colado 50 mm comparação com o modelo analítico (a) C/Anc_Lb50_01 (b) C/Anc_Lb50_02.....	130

Figura 6.41 - Curvas tensão de aderência vs. deslizamento do ensaio de corte simples com ancoragem mecânica com comprimento colado 50 mm comparação com o modelo analítico (a) C/Anc_Lb50_01 (b) C/Anc_Lb50_02	130
Figura 6.42 – Comprimento colado 50 mm, ensaio de corte simples com ancoragem mecânica (a) curva tensão de aderência vs. deslizamento (b) curva força vs. deslizamento	131
Figura 6.43 - Distribuição de deslizamentos, extensões e tensões e ao longo do comprimento colado 50 mm.....	132
Figura 6.44 – Comparação entre o modelo proposto analítico e o trabalho desenvolvido por Biscaia <i>et al.</i> [11] para uma ligação GFRP/betão sem ancoragem mecânica assumindo L_b de 250 mm.	135
Figura 6.45 – Diferenças entre o modelo <i>bond-slip</i> Dai [29] o modelo <i>bond-slip</i> Popovics [37]	136
Figura 6.46 – Comparação/sobreposição entre o modelo analítico não linear proposto e o trabalho desenvolvido por Viegas [34] para uma ligação GFRP/betão com ancoragem mecânica assumindo: (a) $L_b = 50$ mm; (b) $L_b = 250$ mm.....	137
Figura 6.47 - Comparação entre o modelo <i>bond-slip</i> utilizado no trabalho de Ferracuti [22] (fórmula Popovics [37]) e no presente estudo (Modelo Dai <i>et al.</i> [29]).	138
Figura 6.48 - Comparação entre o modelo analítico proposto e o trabalho desenvolvido pela Ferracuti [22] para uma ligação de CFRP/betão com uma ancoragem mecânica e com $L_b = 355$ mm.	139
Figura 6.49 - Comprimento colado 200 mm, ensaio de corte simples sem ancoragem mecânica (a) curva tensão de aderência vs. deslizamento (b) curva força vs. deslizamento	140
Figura 6.50 - Distribuição de deslizamentos, extensões e tensões e ao longo do comprimento colado de 200 mm sem ancoragem mecânica.	141

Índice de tabelas

Tabela 2.1 – Expressões analíticas que definem deslizamento, tensão de aderência e tensão no substrato, Yuan et al. [39]	18
Tabela 2.2 – Características das resinas epoxídicas usadas por T.Yu <i>et al.</i> [62]	28
Tabela 2.3 – Características do adesivo e FRP usados por T.Yu et al. [62].....	29
Tabela 2.4 – Propostas de expressões de força máxima transmitida.....	31
Tabela 4.1 – Instrumentação usada nos ensaios de corte simples sem ancoragem mecânica	60
Tabela 4.2 - Instrumentação usada nos ensaios de corte simples com ancoragem mecânica.....	62
Tabela 5.1 - Parâmetros experimentais dos ensaios de corte simples sem ancoragem mecânica, para um comprimento de ligação efetivo de 110 mm.	64
Tabela 5.2 - Parâmetros experimentais dos ensaios de corte simples com ancoragem mecânica com $L_{\text{eff}} = 110$ mm.....	85
Tabela 6.1 – Parâmetros da <i>bond-slip</i> para cada ensaio com comprimento colado superior ao comprimento efetivo e lei de <i>bond-slip</i> média	94
Tabela 6.2 – Valores das forças máximas e deslizamentos obtidos experimentalmente em comparação com o valor da força máxima analítica do compósito de FRP.....	133

Simbologia

Notações escalares latinas

A	- Extensão máxima teórica
A_p	- Área transversal de CFRP
B	- Índice de rigidez da ligação
b_p	- Largura do laminado de CFRP
b_s	- Largura do bloco de betão
E_p	- Módulo de elasticidade do CFRP
E_s	- Módulo de elasticidade do aço
F	- Força aplicada ao sistema de reforço,
F_{max}	- Força máxima
G_f	- Energia de fratura
h_s	- Altura da viga de aço
L_b	- Comprimento ligado
L_{eff}	- Comprimento de ligação efetivo
n_p	- Constante de Popovics
s_{max}	- Deslizamento máximo
s_{ult}	- Deslizamento último experimental
$s_{ult, 0,05}$	- Deslizamento último analítico para os 5% após o pico da <i>bond-slip</i>
$s_0^{F_{max}}$	- Deslizamento na extremidade livre para a força máxima
t_p	- Espessura do CFRP
t_s	- Espessura do substrato
u_p	- Deslocamento do CFRP
u_s	- Deslocamento do substrato

Notações escalares gregas

α	- Fator de redução
β_w	- Fator geométrico
β_L	- Fator de redução
τ_{\max}	- Tensão de aderência máxima
δ_p	- Deslocamento para além do qual a tensão de aderência deixa de ser zero
ϵ_{\max}	- Extensão máxima experimental
σ_p	- Tensões no CFRP
σ_s	- Tensões no substrato

Abreviaturas

ACI	- American Concrete Institute
AFRP	- Polímero reforçado com fibras de aramida (do inglês aramid fibre reinforced polymer)
ASTM	- American Society for Testing and Materials
CFRP	- Polímero reforçado com fibras de carbono (do inglês carbon fibre reinforced polymer)
EC2	- Eurocódigo 2
EN	- European Norm
Fib	- Fédération Internationale du béton
FRP	- Polímero reforçado com fibras (do inglês fiber reinforced polymer)
GFRP	- Polímero reforçado com fibras de vidro (do inglês glass fiber reinforced polymer)
IPQ	- Instituto Português da Qualidade
ISO	- International Standards Organization
IST	- Instituto Superior Técnico
LERM	- Laboratório de Estruturas e Resistência dos Materiais
LNEC	- Laboratório Nacional de Engenharia Civil
NP	- Norma Portuguesa

Capítulo 1

Introdução

1.1.Aspectos gerais

O reforço, a reparação e a conservação de estruturas são áreas cada vez mais relevantes em Engenharia Civil. Muitas das estruturas começam a esgotar o período de vida inicialmente previsto, atingindo estados de degradação que tornam a sua utilização desaconselhável. Todavia existem mais causas associadas aos danos de uma estrutura: acidentes, sismos, condições atmosféricas adversas, incêndios, falta de conservação, má construção e até a má utilização da mesma [1]. Todos estes motivos podem levar a que seja necessária uma intervenção, de forma a corrigir os problemas e tornar novamente a estrutura funcional. Em termos sísmicos, a necessidade de cumprir a regulamentação vigente torna o reforço de edifícios e pontes com mais de 30 anos uma necessidade emergente.

No entanto as intervenções nas estruturas não ficam resumidas aos casos em que estas se apresentam degradadas e disfuncionais. Com o passar dos anos pode surgir a necessidade de alterar o tipo de função de um edifício, podendo ou não ficar submetido a diferentes tipos de sobrecargas e por vezes cargas permanentes, tendo também de respeitar diferentes normativas [2,3]. Existe ainda a possibilidade de nos edifícios ser necessária uma alteração estrutural, ou seja, de eliminar alguns elementos estruturais passando a ser necessário o reforço dos restantes elementos. No sentido de satisfazer as necessidades referidas anteriormente, começaram a surgir várias técnicas e vários tipos de materiais para reparação e reforço de estruturas.

Nesta dissertação o processo de reforço e reparação estudado é a utilização de materiais compósitos colados em estruturas metálicas. As necessidades referidas e o crescimento do mercado dos materiais compósitos que inicialmente eram utilizados no ramo militar e da aeronáutica, introduziu a aplicação destes materiais na área da construção. Por exemplo, a fibra de carbono tem sido adaptada ao longo dos anos a novos mercados com o seu preço a diminuir consideravelmente, como se verifica na Figura 1.1.

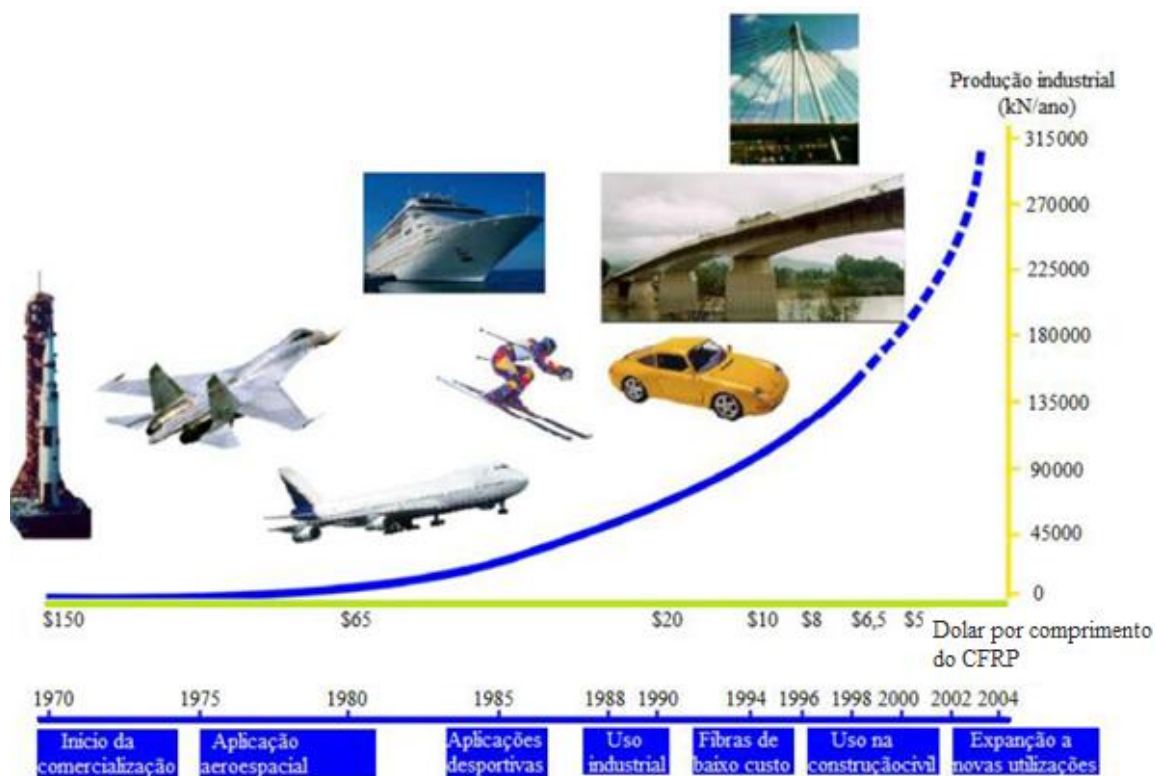


Figura 1.1 - Evolução da utilização da fibra de carbono, em função do seu preço, da sua produção e campo de aplicação [3].

Estes materiais, designados por compósitos, resultam da “união” entre fibras de reforço, orgânicas ou inorgânicas com resina termo endurecível e cargas de enchimento designadas por *fillers*. As fibras de reforço são o material mais resistente do compósito de FRP porém frágil, enquanto que a resina e os fillers são muito pouco resistente, servem para transferência e distribuição das cargas pelas fibras, protegem as fibras das ações ambientais e mantêm as fibras na sua posição evitando a sua encurvadura quando solicitadas à compressão. Os principais tipos de compósitos de fibra comercializados são os de vidro, GFRP (*Glass Fiber Reinforced Polymer*), os de carbono, CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Polymer*), e os de aramida, AFRP (*Aramid Fiber Reinforced Polymer*).

Os compósitos apresentam um peso próprio muito baixo (cerca de 18 kN/m^3 , aproximadamente $\frac{1}{4}$ do aço), elevada resistência à tração, resistência à corrosão, resistência à fadiga, o facto de serem moldáveis, bom amortecimento ao choque e bom isolamento eletromagnético [3]. Para o bom funcionamento do reforço é necessário a compreensão do comportamento isolado dos compósitos e da estrutura e, mais importante, a qualidade da ligação entre ambos. Assim, torna-se importante garantir a aderência do aço com o FRP pelo que, a superfície do aço deve ser preparada e analisada adequadamente para se garantir esta ligação FRP/aço.

Na construção civil, a utilização de colagens é uma prática recorrente já há algumas décadas, sendo aplicada principalmente em elementos não-estruturais. A sua utilização em

elementos estruturais é relativamente recente. Atualmente esta técnica por colagem é aplicada em reforços de elementos estruturais, na execução de painéis *sandwich* ou na fabricação de perfis de alumínio ou de vidro, entre outros. A sua aplicação estrutural é fundamentalmente centrada em dois domínios: i) reparação e reforço – de aplicação mais corrente, e ii) novas construções.

A utilização de técnicas de colagem na reparação e reforço de estruturas existentes é principalmente associada às estruturas de betão armado, com ou sem pré-esforço, embora seja da mesma forma aplicada em estruturas de aço.

No que respeita às estruturas metálicas, as técnicas mais usuais de reabilitação/reforço em elementos estruturais consistem na substituição sequencial dos seus elementos estruturais [5], conduzindo a limitações na utilização das estruturas. O custo associado a estas restrições no uso das estruturas favorece a utilização dos sistemas de reforço de compósitos colados aos elementos metálicos. Dentro dos diferentes sistemas de FRP, são utilizados os de carbono com módulo de elasticidade elevado, devido a terem elevada resistência e rigidez semelhante à do aço [6]. No entanto, a utilização da técnica de reforço com colagem de compósitos em estruturas metálicas não é tão frequente como nas estruturas de betão [7].

Após a Segunda Guerra Mundial, muitas pontes de aço e infra-estruturas foram construídas na Europa, América do Norte e Japão a fim de satisfazer as necessidades de transporte decorrentes do aumento do tráfego de veículos a motor, em particular no período entre 1960 e 1975. Atualmente, cerca de 40-50% das pontes existentes precisam de ser reparadas devido a: danos por fadiga (pela concentração de tensões nas regiões de soldadura) e parafusos ou rebites que provocam corrosão. Técnicas de reparação tradicionais, tais como a utilização de placas de aço unidas ao elemento estrutural danificado por soldadura ou parafusos levam a várias desvantagens [8]: dificuldade de montagem *in situ* do sistema, demasiado pesado, de colagem das chapas metálicas e agravado com a acessibilidade limitada nalguns casos (ex: pontes); risco de corrosão na superfície da junta de ligação do aço ao adesivo e a necessidade de criação de juntas de ligação entre chapas, devido às limitações das dimensões para o seu transporte. Sendo estas desvantagens evitadas usando o compósito de FRP.

O FRP tem um enorme potencial para atender a estas necessidades, principalmente devido às vantagens dos painéis *sandwich* de FRP que permitem peso leve das estruturas de pontes, facilidade de instalação, tráfego mínimo perturbado, grande tolerância à corrosão ambiental, longa vida útil de serviço, bem como baixo custo de manutenção. Outras vantagens em relação às técnicas tradicionais são o aumento mínimo do peso estrutural, a fácil instalação e a alta resistência/rigidez em relação ao peso. Além disso, não há concentrações de tensão a serem produzidas por meio de soldadura ou perfuração de elementos estruturais mais sensíveis à fadiga.

As desvantagens da utilização de FRP como reforço de estruturas metálicas são os modos de rotura (ver Figura 1.2), a falta de dados sobre a durabilidade da camada de adesivo e o custo do material de FRP. O trabalho de investigação torna-se fundamental para estes aspetos.

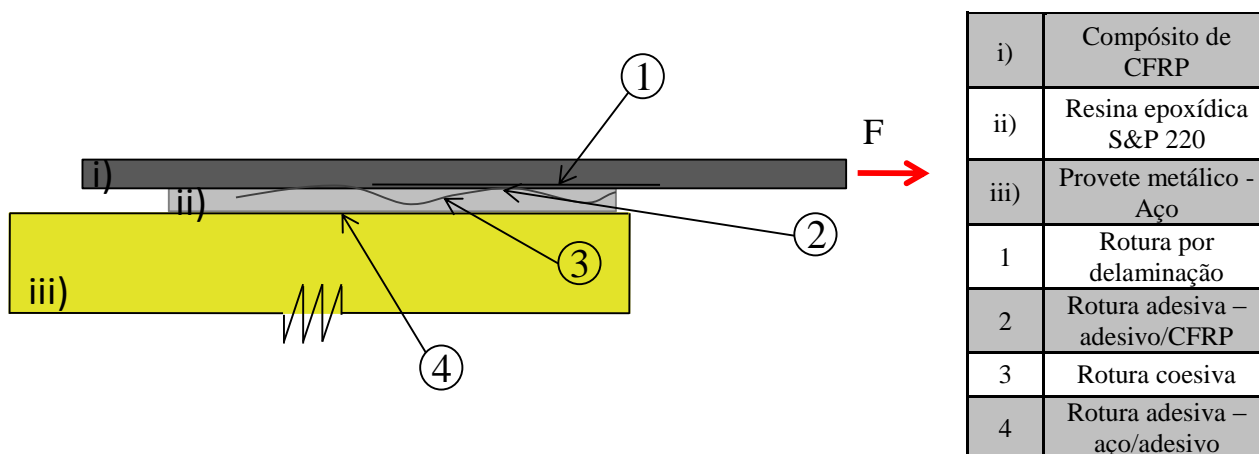


Figura 1.2 – Esquema dos modos de rotura da ligação Aço/FRP

O sucesso da operação e reparação de uma estrutura de aço com compósitos de FRP depende da integridade da ligação entre o reforço e o substrato. As vigas de aço reforçadas com FRP falham/rompem por rotura adesiva (Aço/adesivo e/ou adesivo/CFRP) ou por rotura do laminado (delaminação), veja-se a Figura 1.2. O adesivo é o elemento mais fraco da ligação, pois tanto o aço como o FRP são mais rígidos. Por esta razão, a ligação adesiva do FRP com o aço tem de ser cuidadosamente estudada.

1.2. Objetivo da dissertação

A presente dissertação tem como base ensaios de arrancamento de compósitos de carbono colados a perfis de aço realizados no Laboratório de Estruturas do Departamento de Engenharia Civil (LEDEC) da Faculdade de Ciências e Tecnologia da UNL, e pretende analisar, com pormenor, a aderência entre materiais, pois conforme referido na secção anterior, a ligação entre estes materiais depende do seu bom desempenho.

O presente trabalho tem, também, como objetivo propor um modelo analítico não linear para descrever o processo de descolamento completo da ligação entre um compósito de FRP com um substrato submetido a uma carga mecânica. Além disso, a influência de uma ancoragem mecânica colocada na extremidade oposta à carregada é ainda motivo de análise. O modelo analítico proposto é bastante geral porque pode ser aplicado não apenas a sistemas EBR, mas também para sistemas NSM com compósitos em forma de barra ou em forma de varão. No entanto, o sistema EBR é o mais realçado porque os sistemas NSM não são aplicados em estruturas metálicas.

A novidade do modelo proposto analítico é que se considera uma curva *bond-slip* não linear e tipo exponencial encontrada na literatura [9] e que permite simular o processo de

descolamento completo das interfaces de FRP com o substrato com e sem a adição de uma ancoragem mecânica. Acredita-se que, até agora, foram propostas apenas estratégias numéricas com base nesta e outras curvas *bond-slip* não lineares e não há estudos analíticos relatados à data, devido a dificuldades em encontrar uma solução exata para a equação diferencial de equilíbrio do problema.

Soluções exatas para estimarem o deslizamento, a tensão no compósito de FRP, a tensão de aderência ao longo da interface são também abordadas. Além disso, as expressões para calcular a força transmitida ao compósito de FRP com o substrato ou o comprimento efetivo de ligação são também discutidos. No final, as comparações entre as soluções exatas obtidas do método analítico proposto com outros estudos disponíveis na literatura são apresentadas.

De forma mais detalhada, apresentam-se em seguida os objetivos principais a cumprir no desenvolvimento desta dissertação:

- Realização de uma pesquisa sobre a literatura técnica existente em torno da temática em análise;
- Apresentação, análise e crítica de alguns resultados obtidos por outros autores;
- Definir um programa de ensaios exequível, de forma a avaliar que tipo de preparação de superfície e ligação será mais adequado para utilizar no reforço com compósitos de CFRP;
- Realização de ensaios para perceber melhor o desempenho da ligação FRP/aço;
- Comparação do modelo analítico proposto com os ensaios realizados;
- Análise e comparação entre os valores encontrados na literatura e os da dissertação.

1.3.Estruturação e organização

O presente documento é constituído por sete capítulos, incluindo introdução e conclusões. De um modo sucinto, apresentam-se de seguida os conteúdos presentes em cada um dos capítulos.

No Capítulo 1 fez-se uma introdução ao tema discutido na presente dissertação.

No Capítulo 2 apresentam-se os principais desenvolvimentos ao nível do reforço de vigas ao longo das últimas décadas, bem como informações detalhadas das características de sistemas de reforço com compósitos de CFRP, apresentam-se, também, os tipos de preparações de superfícies do aço e ainda o comportamento da ligação do FRP/aço. São ainda expostas as recomendações de cálculo e dimensionamento presentes na bibliografia mais relevante à data.

No Capítulo 3 apresentam-se os modelos analíticos não lineares com e sem ancoragem mecânica.

No Capítulo 4 definem-se os materiais usados nos ensaios e as suas características, define-se, também, o ensaio de arrancamento da estrutura metálica com o CFRP, caracterizando a sua geometria e os materiais usados, tanto como a preparação da superfície da estrutura metálica.

O Capítulo 5 consiste nos resultados obtidos dos diferentes parâmetros avaliados nos ensaios experimentais para os dois sistemas testados, i.e. com e sem recorrer a uma armação mecânica.

O Capítulo 6 consiste na análise e tratamentos dos dados experimentais fornecidos no capítulo anterior. Faz-se ainda uma comparação entre os resultados e os resultados analíticos.

No Capítulo 7 resumem-se as principais conclusões obtidas com o trabalho desenvolvido, apresentando-se ainda recomendações para eventuais trabalhos de investigação futuros.

Capítulo 2

Revisão bibliográfica - ligação adesiva FRP/substrato

2.1.Introdução

O reforço com armaduras exteriores, nomeadamente chapas metálicas, na região mais tracionada dos elementos, foi ganhando relevância face à sua simplicidade de execução, ao aumento significativo da rigidez da estrutura e da capacidade resistente dos elementos. No entanto, este tipo de reforço apresenta má relação resistência/peso e grande vulnerabilidade à corrosão devido à exposição a que está sujeito, por as armaduras serem exteriores. A solução para combater o problema da durabilidade do reforço passaria assim pela aplicação de um reforço não metálico.

No final da década de 80, começou-se a adotar o uso de compósitos reforçados com fibras, FRP [10]. Este material garante, não só, a resistência à corrosão, mas também a relação resistência/peso do reforço e ainda uma maior facilidade de adaptação aos elementos a reforçar.

Desta forma, este tipo de materiais e a sua aplicação na construção tem sido alvo de uma intensa investigação, existindo ainda aspetos desconhecidos, relacionados com a durabilidade destes materiais quando sujeitos a ambientes adversos e, principalmente, com a ligação destes materiais ao aço. Este aspeto, importante na colagem de chapas metálicas, torna-se essencial nos materiais compósitos, uma vez que a utilização de buchas de ligação é desapropriada ficando o sistema a depender exclusivamente do bom funcionamento da ligação compósito-resina-aço.

Apresentam-se nos pontos seguintes a revisão bibliográfica realizada no âmbito do tema da presente dissertação, tendo a mesma sido baseada em resultados de trabalhos experimentais e em propostas regulamentares publicadas no âmbito científico e ainda em algumas dissertações de mestrado e doutoramento. O desenvolvimento de todos estes elementos é resultado do crescimento considerável que o reforço de estruturas por meio de materiais compósitos tem tido nos últimos anos, bem como da necessidade de dominar o conhecimento do comportamento destes sistemas de reforço.

A presente revisão bibliográfica visou principalmente aprofundar a compreensão do comportamento da ligação entre os compósitos de CFRP e o aço, porém são escassos os estudos com estes dois elementos (Aço e CFRP) em conjunto. Por isso, realizou-se um estudo geral sobre a ligação adesiva entre compósitos e o substrato, i.e., para qualquer compósito (CFRP, GFRP ou AFRP) e qualquer tipo de substrato (Aço ou betão), visto os comportamentos serem semelhantes e apenas influenciar na lei de *bond-slip*.

2.2.Revisão bibliográfica

O reforço por colagem exterior (EBR) de vigas começou por se estabelecer ligando o compósito de FRP diretamente à superfície da viga. Contudo, com esta técnica, as roturas associadas às vigas ocorrem para 40-60% da tensão de rotura do compósito de FRP [11]. Assim, a resistência do compósito de FRP nunca é atingida. Para melhorar o desempenho dos sistemas de EBR, diversos estudos tem analisado o efeito da adição e ancoragens mecânicas no sistema EBR [12-20], com a finalidade de retardar ou evitar o descolamento prematuro do compósito de FRP do elemento reforçado e melhorar assim o desempenho da ligação do FRP/substrato.

Vários autores [21-34] têm vindo a propor teorias para justificar o fenómeno do descolamento prematuro da ligação entre o FRP e o substrato. Estas teorias são essencialmente baseadas na mecânica da fratura linear e não linear e que têm tido suporte experimental em ensaios de corte simples ou duplo de forma a analisar a energia de rotura modo II (deslocamento relativo entre os materiais da ligação, ver subcapítulo 2.9).

2.3.Ensaio de corte simples

Vários ensaios de corte simples podem ser encontrados na literatura, e.g [17, 45, 50]. Em seguida apresentam-se alguns desses ensaios, fazendo uma descrição mais detalhada. A Figura 2.1 representa o ensaio de corte simples, que consiste simplesmente na aplicação de uma força de tração na extremidade livre do compósito de FRP. O compósito de FRP é colado numa das faces do substrato/provete, e a ligação é sujeita a ensaio de corte simples. As forças junto da interface FRP/substrato provocam uma rotura cujo tipo depende das características da ligação.

O ensaio de corte simples com ancoragem mecânica está ilustrado na Figura 2.2. Ferracuti [22] nos seus trabalhos experimentais, à semelhança do ensaio de corte simples, colocou um mecanismo de ancoragem na extremidade oposta à aplicação da força, tal como ilustra a Figura 2.2 b). As situações de ensaio esquematizadas são responsáveis por mobilizar o modo de rotura II, permitindo evidenciar as características da ligação ao corte e assim conhecer a

distribuição dos deslizamentos e tensões de aderência geradas ao longo do processo de deslizamento da ligação.

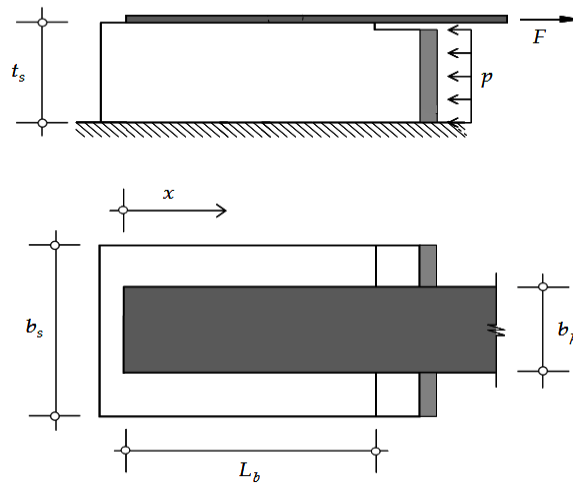
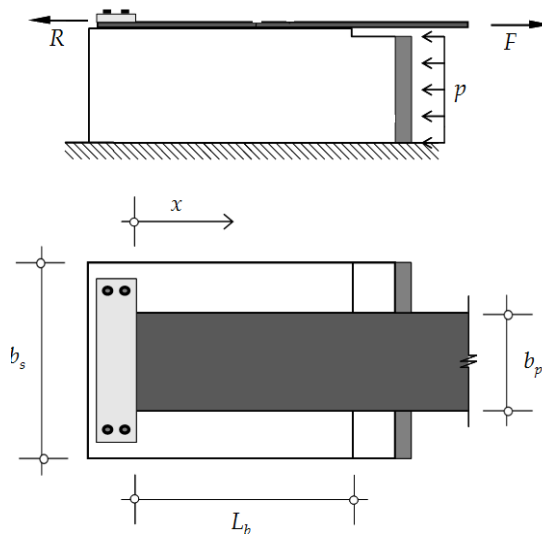
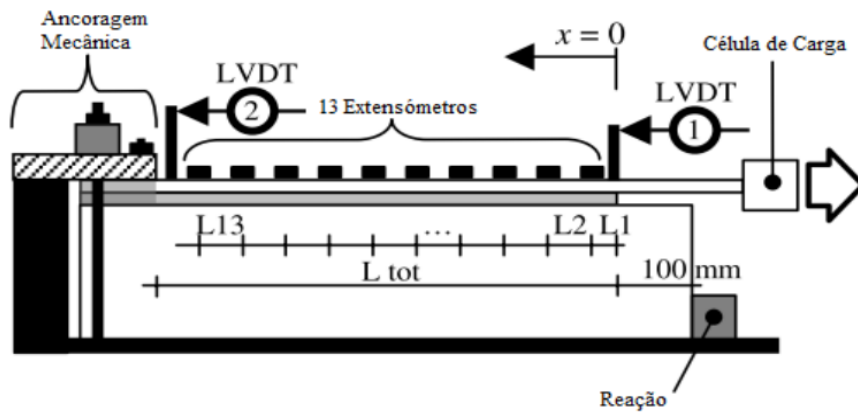


Figura 2.1 – Ensaio de corte simples sem ancoragem mecânica



(a)



(b)

Figura 2.2 – Ensaio de corte simples com amarração mecânica (a) ensaios de corte simples (b) ensaio de Ferracuti [22]

2.4. Lei de *bond-slip*

A curva das tensões de aderência vs. deslizamento é designada na literatura por *bond-slip*. As tensões de aderência geradas ao longo do comprimento colado dependem do deslizamento entre o material de reforço e o substrato. Na literatura podem ser encontradas várias leis locais *bond-slip* que, com maior ou menor aproximação, visam descrever o comportamento real da interface. Alguns autores [28,49] têm assumido várias leis *bond-slip* nos seus modelos numéricos. A Figura 2.3 mostra alguns modelos existentes na literatura.

Biscaia *et al.* [45] para simular o comportamento da ligação FRP/substrato assumiu os modelos lineares seguintes: rígido com amolecimento linear, ascendente com rotura frágil e rígido-plástico. Outros modelos não lineares foram ainda estudados:

- i. Expressão de Popovics [37]:

$$\frac{\tau(s)}{\tau_{max}} = \frac{s}{s_{max}} \cdot \frac{n_p}{(n_p - 1) + \left(\frac{s}{s_{max}}\right)^{n_p}} \quad (2.1)$$

- ii. Curva exponencial referida nos trabalhos de Dimande [8]:

$$\frac{\tau(s)}{\tau_{max}} = \frac{s}{s_{max}} \cdot e^{1 - \frac{s}{s_{max}}} \quad (2.2)$$

- iii. Curva exponencial proposta do Dai *et al.* [44]:

$$\frac{\tau(s)}{\tau_{max}} = 4 \cdot \left(e^{-\ln(2) \cdot \frac{s}{s_{max}}} - e^{-2 \cdot \ln(2) \cdot \frac{s}{s_{max}}} \right) \quad (2.3)$$

- iv. Expressão modificada de Popovics proposta por Biscaia *et al.* [24]:

$$\frac{\tau(s)}{\tau_{max}} = C \cdot \frac{s}{s_{max}} \cdot \frac{n_p}{(n_p - 1) + \left(\frac{s}{s_{ult}}\right)^{n_p}} \cdot \left(1 - \frac{s}{s_{ult}}\right) \quad (2.4)$$

onde a tensão máxima de aderência (τ_{max}) e o deslizamento associado a essa tensão (s_{max}) são, respetivamente, dados por:

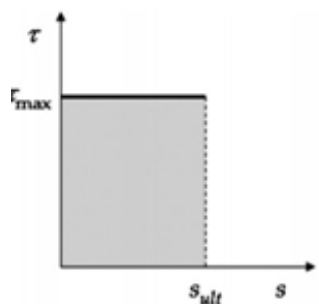
$$\tau_{max} = B \cdot 0,5 \cdot G_f \quad (2.5)$$

$$s_{m\acute{a}x} = \frac{\ln(2)}{B} \quad (2.6)$$

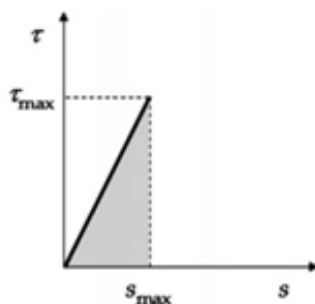
onde B é um índice de rigidez obtido experimentalmente e ajustável à curva extensão vs. deslizamento, enquanto n_p é uma constante que faz aproximar a expressão de Popovics ao comportamento real da interface reforço/substrato.

A curva *bond-slip* local usada nesta dissertação pode ser descrita por um ramo ascendente não linear seguida por um ramo descendente não linear. No entanto, a curva *bond-slip* tem sido motivo de várias propostas, conforme resumido em [28] e ilustrado na Figura 2.3. Lineares ou bi-lineares estas curvas de *bond-slip* são consideradas como aproximações às curvas *bond-slip* reais que podem dar boas indicações sobre a estimativa da força transmitidas ao compósito de FRP. Além disso, as curvas *bond-slip* lineares ou bi-lineares podem indicar algumas pistas sobre a estimativa do comprimento efetivo da ligação (L_{eff}) conforme descrito em [7, 25] e permitindo a sua aplicação em recomendações ou normas nacionais ou internacionais.

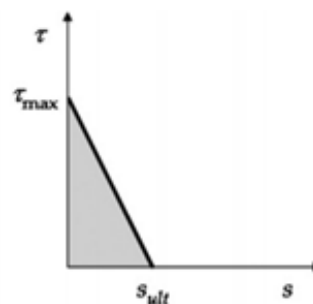
A utilização de curvas de *bond-slip* não lineares apresenta dificuldades adicionais em encontrar soluções analíticas exatas capazes de descrever o fenómeno de descolamento da interface entre o FRP e o substrato. Essas dificuldades foram superadas por alguns autores [22, 23-25, 32] que foram modelando essas interfaces com recurso a métodos de elementos finitos ou métodos discretos simplificados, a fim de, prever com melhor exatidão, o fenómeno de descolamento prematuro da interface entre um FRP e o substrato.



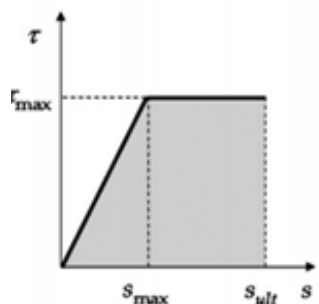
(a) Modelo rígido-plástico



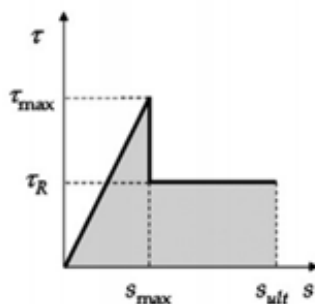
(b) Modelo linear



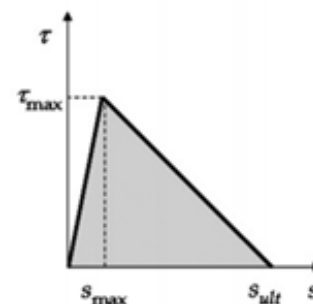
(c) Modelo linear amolecido



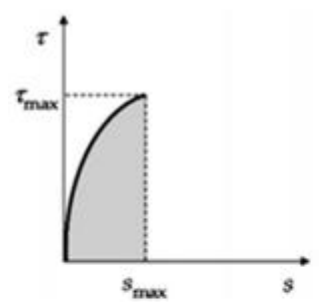
(d) Modelo1 elasto-plástico



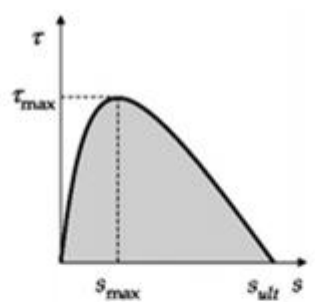
(e) Modelo2 elasto-plástico



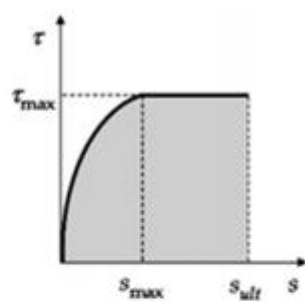
(f) Modelo Bi-linear



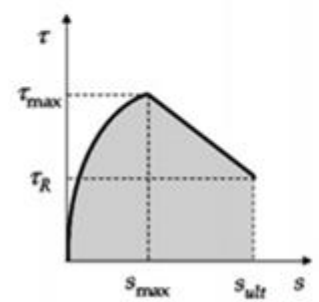
(g) Modelo Quadrático1



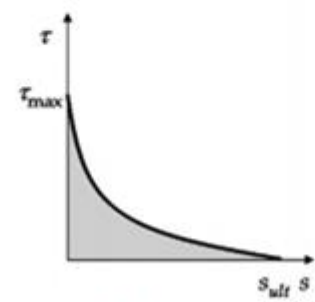
(h) Modelo Quadrático2



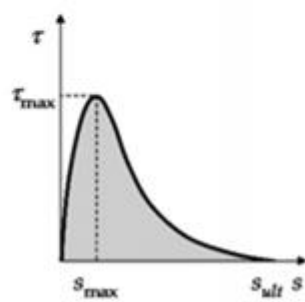
(i) Modelo quadrático-plástico



(j) Modelo quadrático-linear



(k) Modelo exponencial



(l) Modelo exponencial

Figura 2.3 - Modelos da lei *bond-slip* [45]

2.5. Desempenho total da ligação FRP/substrato

O desempenho total da ligação FRP/substrato, com base em curvas de *bond-slip* não lineares, é de difícil análise. Diferentes autores [22, 24, 30-33] analisaram o pós-colapso da interface entre o FRP com o substrato com base em modelos numéricos simplificados.

Alguns estudos e.g. [22, 25, 31, 33] identificaram o fenómeno de *snap-back* nas ligações do FRP/betão durante a sua fase de pós-colapso em situações em que o comprimento de colagem (L_b) é maior do que o comprimento efetivo da ligação (L_{eff}). A Figura 2.4 (curva a vermelho (2)) evidencia esse fenómeno de *snap-back*. Outros autores, como Biscaia, Teng, Viegas, Teixeira, entre outros, e.g. [24, 31, 34, 35, 36], concluíram que durante o pós-colapso da ligação FRP/substrato em que $L_b \geq L_{eff}$, o andamento da curva força vs. deslizamento termina quando todo o comprimento colado atinge o deslizamento final (s_{ult}) (curva a preto (1)). Estas diferenças devem-se à limitação ou não do deslizamento último (s_{ult}) da curva *bond-slip*. A Figura 2.4 ilustra os aspetos das curvas *bond-slip* 1 (com s_{ult}) e 2 (sem s_{ult}) e a curva 2 mostra o fenómeno de *snap-back* durante o pós-colapso da ligação.

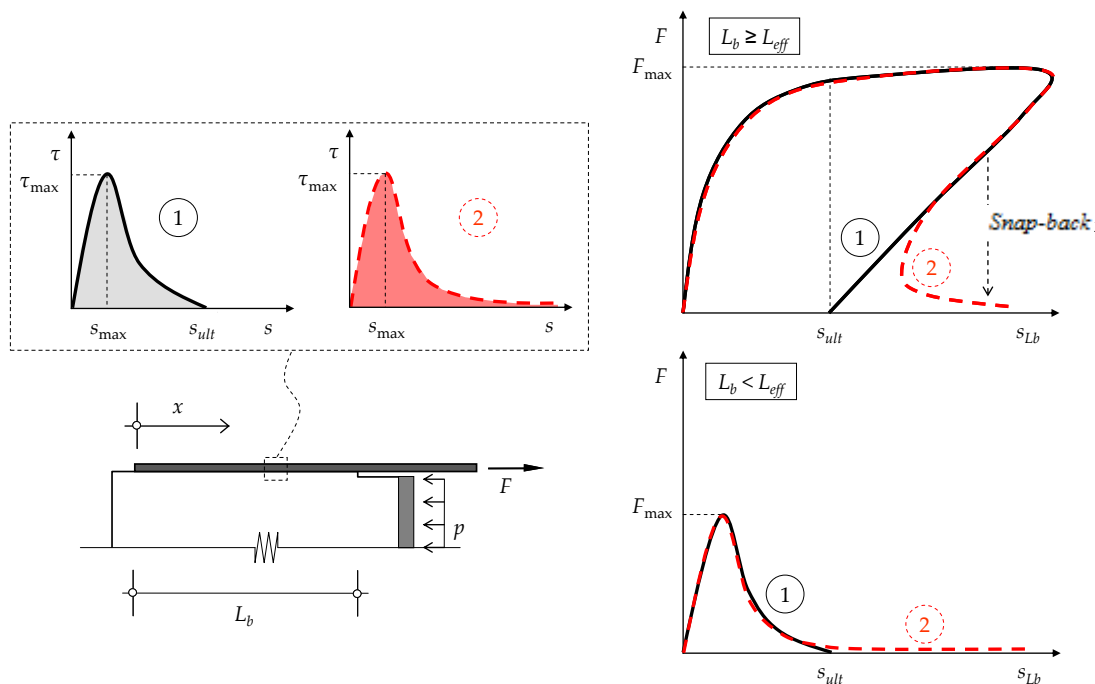


Figura 2.4 - Diferença de comportamento de descolamento para as curvas *bond-slip* não lineares com e sem um deslizamento final [46]

2.6. Análise numérica de Ferracuti: comportamento completo da ligação sem ancoragem mecânica

Ferracuti [22] assumiu um modelo *bond-slip* com base na fórmula de Popovics [37] para localmente simular o comportamento da ligação CFRP/betão. Ferracuti [22], desenvolveu um modelo numérico discreto simplificado e, com base nos ensaios experimentais de Chajes et al. [38], propôs uma estratégia de solução numérica, a fim de estimar o comportamento completo da ligação CFRP/betão. Nesse modelo numérico assumiu-se que a tensão de aderência é constante ao longo da largura da ligação CFRP/betão e que a equação diferencial de equilíbrio da ligação foi resolvida recorrendo ao Método das Diferenças Finitas (MDF). O comprimento colado foi discretizado em vários troços e o sistema de equações não lineares resolvido com o método de Newton-Raphson. O progresso de descolamento da ligação foi realizado através do controle do deslizamento. Inicialmente, o controlo do deslizamento é feito em $x = L_b$ (s_{Lb}), no entanto, quando a carga e o deslizamento diminuem, fenómeno de *snap-back*, uma mudança de parâmetro de controlo foi implementada. Portanto, no início da fase de pós-colapso, Ferracuti [22] optou por controlar o deslizamento na extremidade livre do compósito de FRP em $x = 0$, pois nesse ponto o deslizamento faz-se de forma monotónica durante todo o processo de descolamento da ligação CFRP/betão. Na Figura 2.5 encontra-se o esboço dos ensaios realizados por Ferracuti e na Figura 2.6 os resultados experimentais em comparação com o modelo numérico relativamente a força máxima ao longo do comprimento colado da ligação FRP/betão e a tensão de aderência vs. deslizamento. Verifica-se que o modelo numérico aproxima-se bem dos valores obtidos dos ensaios experimentais, levando a concluir que o modelo numérico empregue é um bom modelo para descrever a ligação FRP/betão.

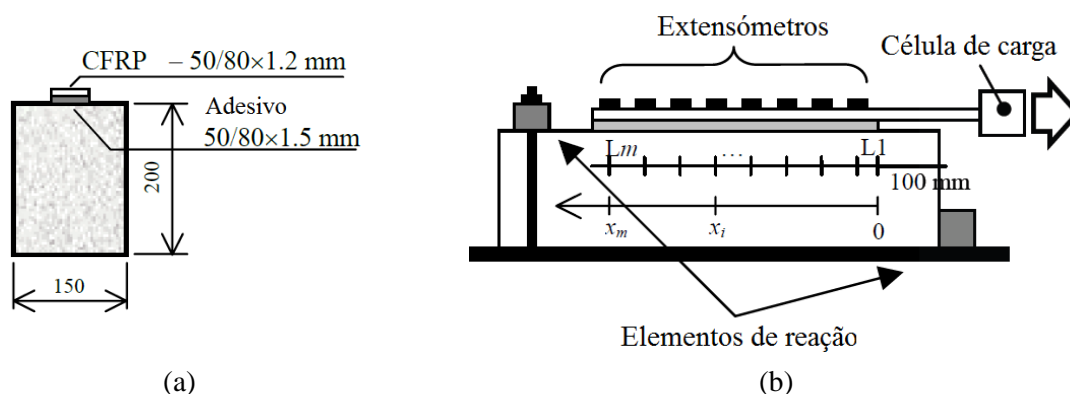
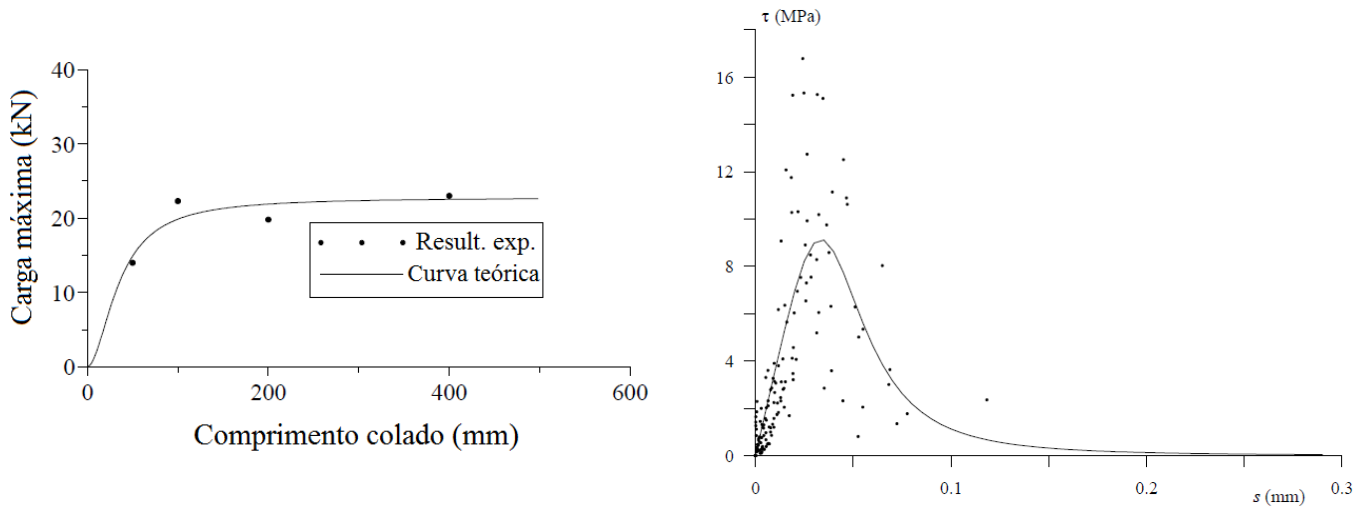
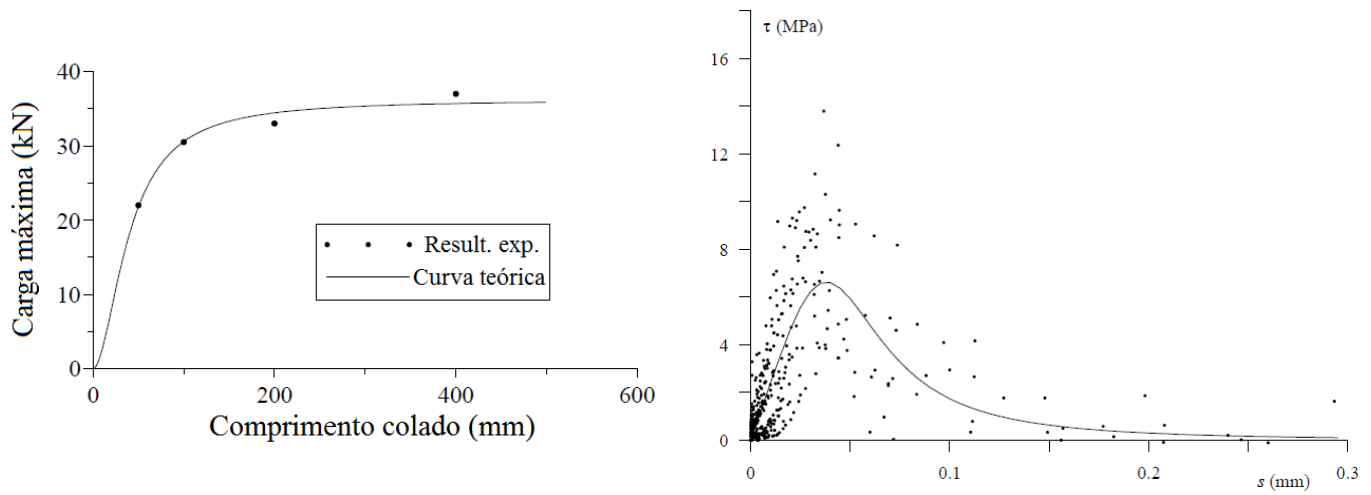


Figura 2.5 – Secção dos provetes ensaiados por Ferracuti (a) e esboço dos ensaios experimentais realizados por Ferracuti (b) [22]



(a) $b_p = 50$ mm



(b) $b_p = 80$ mm

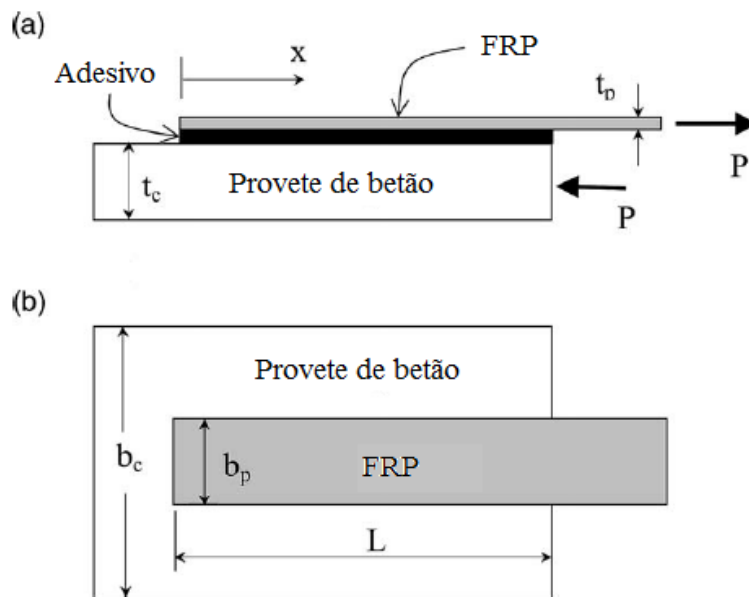
Figura 2.6 – Resultados numéricos e experimentais obtidos por Ferracuti [22]

2.7. Solução analítica de Yuan e Caggiano: comportamento da ligação FRP/substrato sem ancoragem mecânica

Yuan et al. [39] e Caggiano et al. [40] propuseram soluções analíticas para simular o comportamento completo de ligações entre compósitos de FRP e o betão recorrendo a modelos *bond-slip* bilineares. Em ambos os estudos, os autores analisaram todas as fases da ligação FRP/betão e para cada estado, as diversas equações estimaram o progresso do descolamento do CFRP/ betão. Yuan et al. [39] propõem a solução analítica com base na equação diferencial de equilíbrio da ligação FRP/betão:

$$\frac{d\sigma_p(x)}{dx} - \frac{\tau(x)}{t_p} = 0 \quad (2.7)$$

onde o sistema de ensaio de corte simples é constituído por um provete de betão, um adesivo e uma barra de FRP, conforme mostra a Figura 2.7.



(a) – Alçado do sistema de ensaio

(b) - Vista superior do sistema de ensaio

Figura 2.7 – Esboço do sistema de ensaio de Yuan et al [39]

Um modelo *bond-slip* do tipo bilinear (ver Figura 2.8) é limitado por um deslizamento último (δ_f) e, portanto, o comportamento completo da interface entre o CFRP e o betão são bastante semelhantes aos mostrados pelas curvas de carga vs. deslizamento da Figura 2.4, como se pode verificar na Figura 2.9.

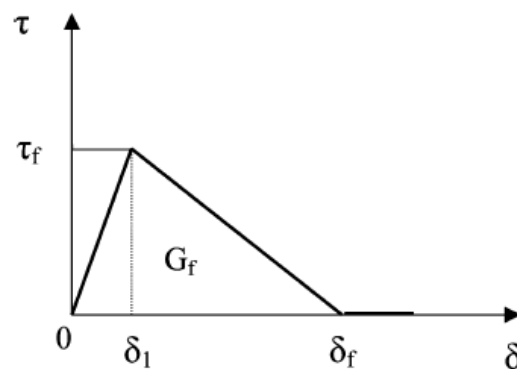


Figura 2.8 – Modelo *bond-slip* do tipo bilinear usado nos estudos analíticos de Yuan et al. [39]

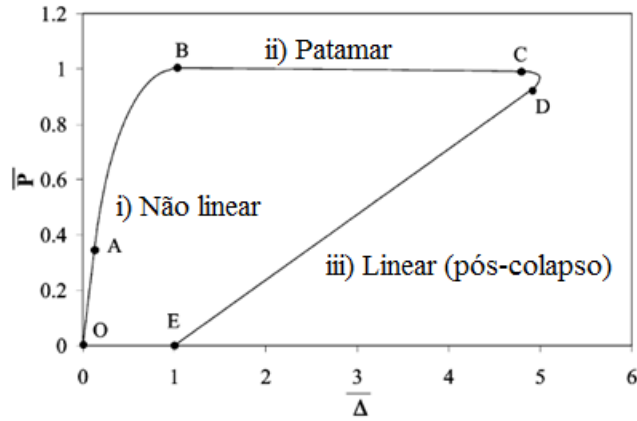


Figura 2.9 – Modelo analítico da ligação do FRP/betão para força vs. deslizamento adimensional, Yuan et al. [39]

A Eq. (2.8) descreve o modelo *bond-slip* bilinear para os diferentes ramos:

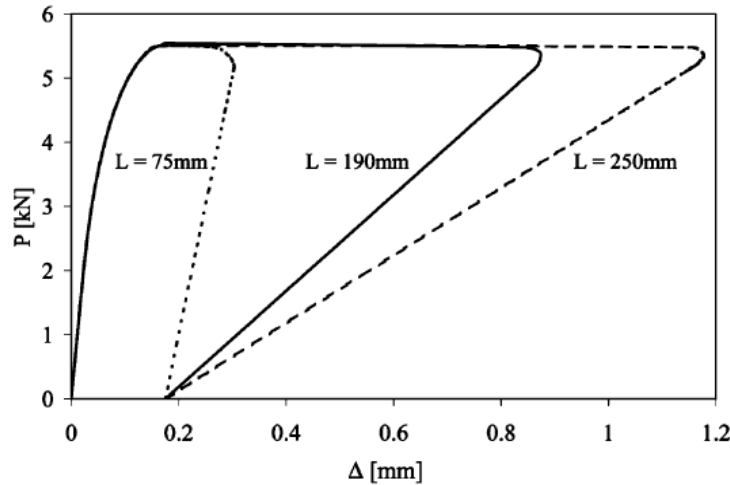
$$f(\delta) = \begin{cases} \frac{\tau_f}{\delta_1} \delta & \text{onde } 0 \leq \delta \leq \delta_1 \\ \frac{\tau_f}{\delta_f - \delta_1} (\delta_f - \delta) & \text{onde } \delta_1 < \delta \leq \delta_f \\ 0 & \text{onde } \delta > \delta_f \end{cases} \quad (2.8)$$

As expressões que definem o deslizamento, a tensão de aderência e a tensão do betão determinadas por Yuan et al. [39] para os diferentes ramos do modelo *bond-slip* do tipo bilinear são resumidas na Tabela 2.1.

A partir das expressões de força (P) indicadas na Tabela 2.1 Yuan fez gráficos de força vs. deslizamento para diferentes comprimentos, Figura 2.10 (a), tem um andamento idêntico ao da Figura 2.4 curva (1), pois ambos os casos tem limitado o deslizamento último, δ_f ou s_{ult} . A Figura 2.11 (b) mostra as curvas força vs. deslizamento para diferentes módulos de rigidez axial do FRP, influenciando assim a fase não linear da curva com um declive maior quanto maior a rigidez axial e consequentemente uma força maior de rotura.

Tabela 2.1 – Expressões analíticas que definem deslizamento, tensão de aderência e tensão no substrato, Yuan et al. [39]

Estado elástico	Estado elástico-pós-pico
$\delta = \frac{\delta_1}{\tau_f} \frac{P \lambda_1 \cosh(\lambda_1 x)}{b_p \sinh(\lambda_1 L)}$ $\tau = \frac{P \lambda_1}{b_p} \frac{\cosh(\lambda_1 x)}{\sinh(\lambda_1 L)}$ $\sigma_p = \frac{P \sinh(\lambda_1 x)}{b_p t_p \sinh(\lambda_1 L)}$	$\delta = (\delta_f - \delta_1) \left\{ \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \tanh[\lambda_1(L - a)] \right.$ $\times \sin[\lambda_2(x - L + a)]$ $\left. - \cos[\lambda_2(x - L + a)] + \frac{\delta_f}{\delta_f - \delta_1} \right\}$ $\tau = -\tau_f \left\{ \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \tanh[\lambda_1(L - a)] \sin[\lambda_2(x - L + a)] \right.$ $\left. - \cos[\lambda_2(x - L + a)] \right\}$ $\sigma_p = \frac{\tau_f}{\lambda_2 t_p} \left\{ \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \tanh[\lambda_1(L - a)] \cos[\lambda_2(x - L + a)] \right.$ $\left. + \sin[\lambda_2(x - L + a)] \right\}$
$0 \leq \delta \leq \delta_1$	$\delta_1 \leq \delta \leq \delta_f$
onde:	onde:
$\lambda_1^2 = \lambda^2 \frac{2G_f}{\delta_1 \tau_f} = \frac{\tau_f}{\delta_1} \left(\frac{1}{E_p t_p} + \frac{b_p}{b_c E_c t_c} \right)$ $P = \frac{\tau_f b_p}{\lambda_1} \frac{\Delta}{\delta_1} \tanh(\lambda_1 L)$	$\lambda_2^2 = \lambda^2 \frac{2G_f}{(\delta_f - \delta_1) \tau_f} = \frac{\tau_f}{\delta_f - \delta_1} \left(\frac{1}{E_p t_p} + \frac{b_p}{b_c E_c t_c} \right)$ $P = \frac{\tau_f b_p}{\lambda_2}$



(a)

Figura 2.10 - Curvas carga vs. deslizamento (a) diferentes comprimentos colados, Yuan *et al.* [39]

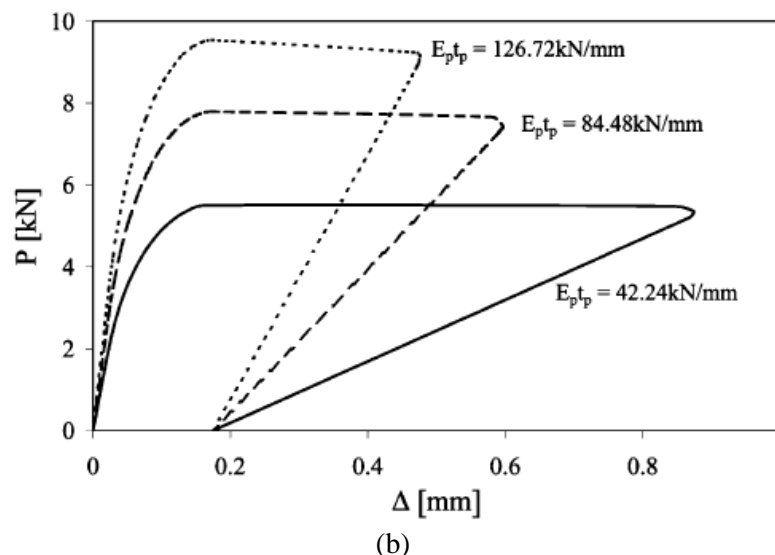


Figura 2.11 – Curvas carga vs. deslizamento (b) vários módulos de rigidez do FRP, Yuan *et al.* [39]

2.8. Análise numérica de Ferracuti e Viegas[34]: comportamento da ligação CFRP/substrato com ancoragem mecânica

Para além dos sistemas EBR, outros estudos que descrevem o processo de descolamento da ligação FRP/substrato quando uma ancoragem mecânica é adicionada podem ser encontrados na literatura [19, 22, 34, 36,42]. Na prática, a ancoragem mecânica restringe os deslizamentos da extremidade oposta à aplicação de carga mudando as condições de fronteira do problema. Desta forma consegue-se melhorar o desempenho da ligação FRP/substrato.

Ferracuti [22] e Mazzotti *et al.* [42] estudaram o desempenho de sistemas EBR com uma ancoragem mecânica adicional. Em particular analisaram o desempenho de ligações entre compósitos de CFRP com o betão. A partir desses estudos, foi possível identificar três ramos principais na resposta carga vs. deslizamento: o primeiro ramo é quase linear; o ramo seguinte representa o processo de deslizamento a um valor constante de força aplicada; no último ramo, após completar o ramo constante, apenas o compósito de CFRP é capaz de resistir, proporcionando um comportamento elástico linear até à rotura [22], conforme mostra a Figura 2.12.

Viegas [34] desenvolveu um modelo numérico baseado num modelo discreto simplificado para analisar sistemas EBR e NSM com barras e varões. No caso particular dos sistemas de EBR, Viegas [34] também estudou as diferenças entre estes sistemas quando a extremidade apostada à carregada está livre e quando a esta extremidade se associa uma ancoragem mecânica.

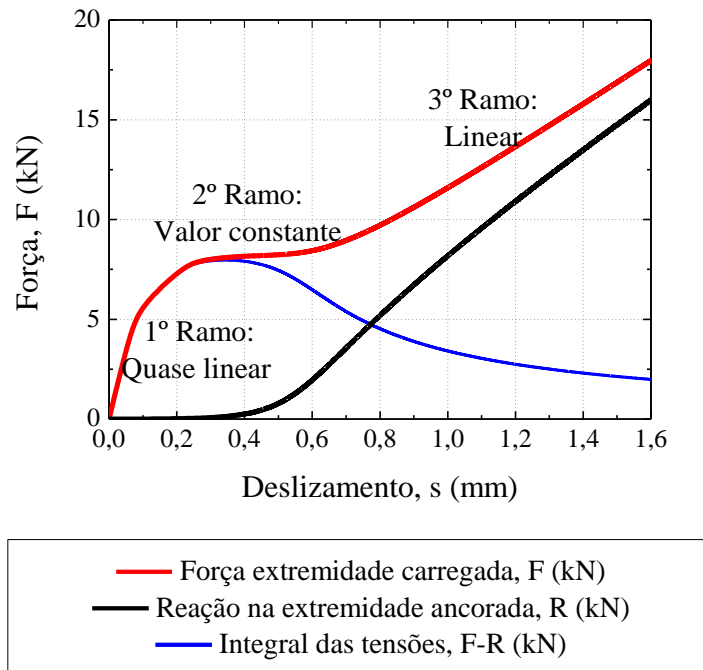


Figura 2.12 – Identificação dos ramos na curva força vs. deslizamento dos ensaios de corte simples com ancoragem mecânica, com comprimento colado de 200 mm.

A análise numérica foi suportada por uma discretização de molas do compósito de FRP e da interface, veja-se a Figura 2.13. As molas que simulavam o compósito de FRP tiveram um comportamento constitutivo linear enquanto que as molas que simulavam a interface tinham um comportamento não linear.

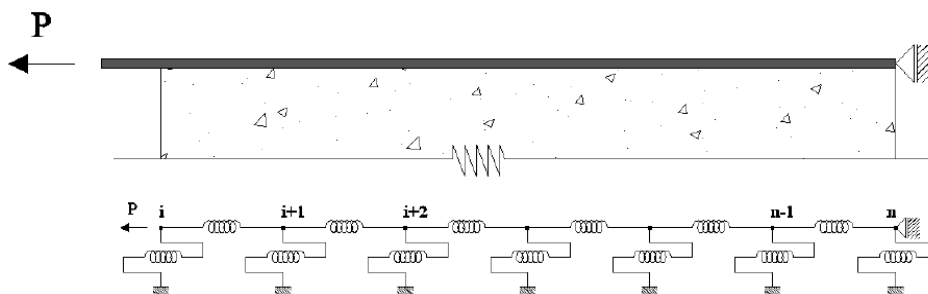


Figura 2.13 – Modelo discreto para o sistema de ancoragem com ancoragem mecânica na extremidade, Viegas [34]

Apesar da versatilidade do modelo numérico, Viegas [34] só usou um modelo *bond-slip* não linear com base na fórmula de Popovics [37] para comparar as duas soluções: com e sem a ancoragem mecânica. Os resultados foram bastante claros no melhoramento do desempenho da ligação FRP/substrato, como se verifica na Figura 2.14. Em [34] foi dada mais relevância aos casos com comprimentos colados mais curtos ($L_b < L_{eff}$) porque o desempenho da interface observada nos sistemas EBR é altamente melhorado quando se usa uma ancoragem mecânica.

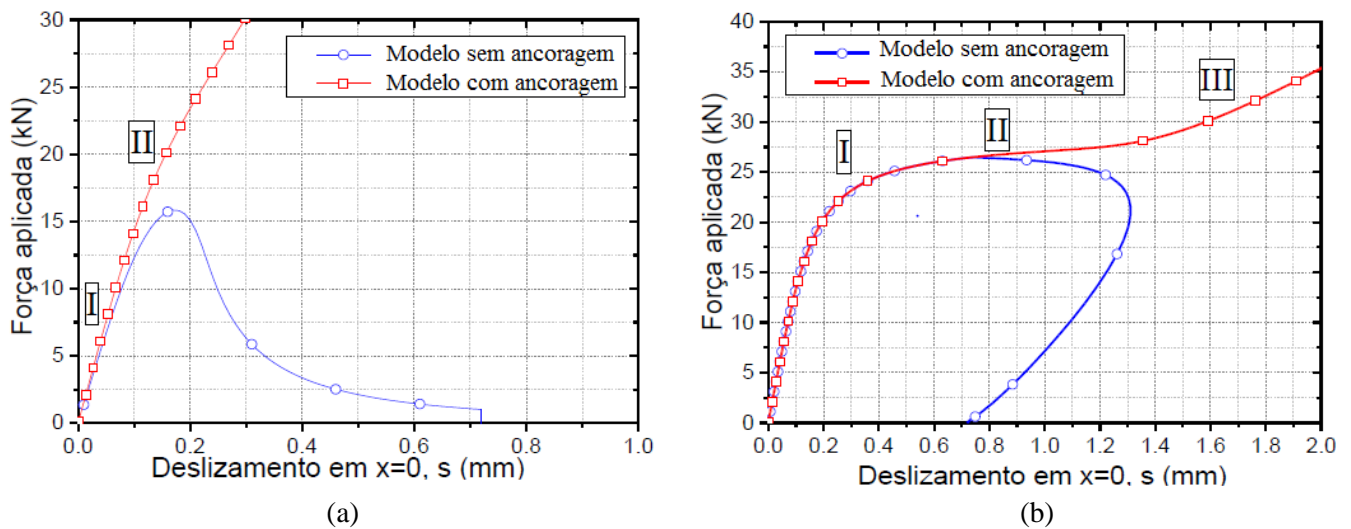


Figura 2.14 – Comparação de modelos para comprimento colados de 50 mm e 250 mm: (a) $L_b < L_{eff}$, (b) $L_b > L_{eff}$
Viegas [34]

2.9. Tipos de roturas da ligação FRP/aço

Xia e Teng [27] estudaram os parâmetros que afetam o comportamento da ligação FRP/aço através de uma série de ensaios de corte simples a fim de estudar o elemento mais fraco da ligação e as variáveis que influenciam esse material, i.e. as características da resina epoxídica. Na Figura 2.15 pode ser analisar o ensaio de corte simples sem ancoragem mecânica e as características dos provetes ensaiados por Xia e Teng [27].

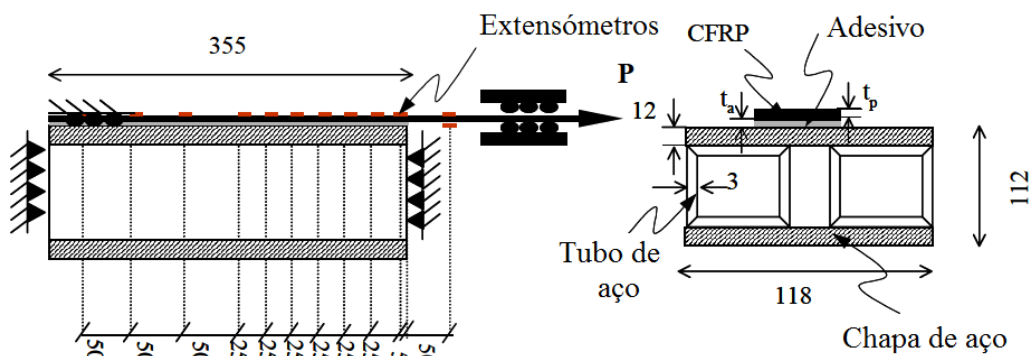


Figura 2.15 – Esboço dos ensaios de corte simples realizados por Xia e Teng [27]

Com base no trabalho de Biscaia [11], a ligação entre dois materiais colados entre si falham por três modos distintos consoante a aplicação da força, a Figura 2.16 mostra esquematicamente os três modos de fratura.

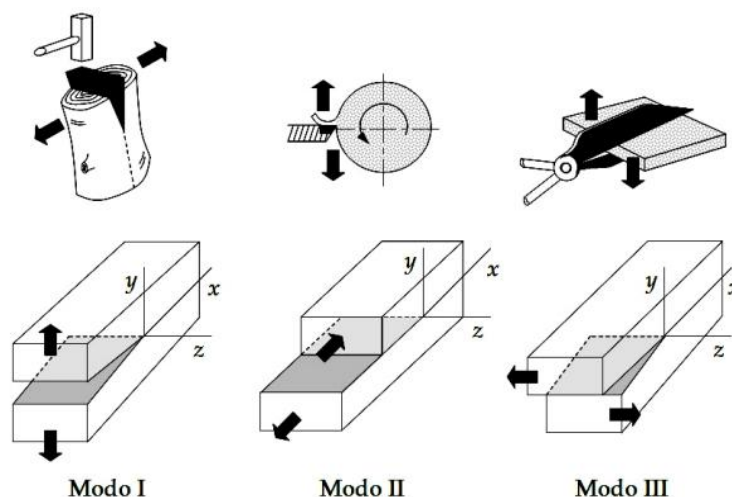
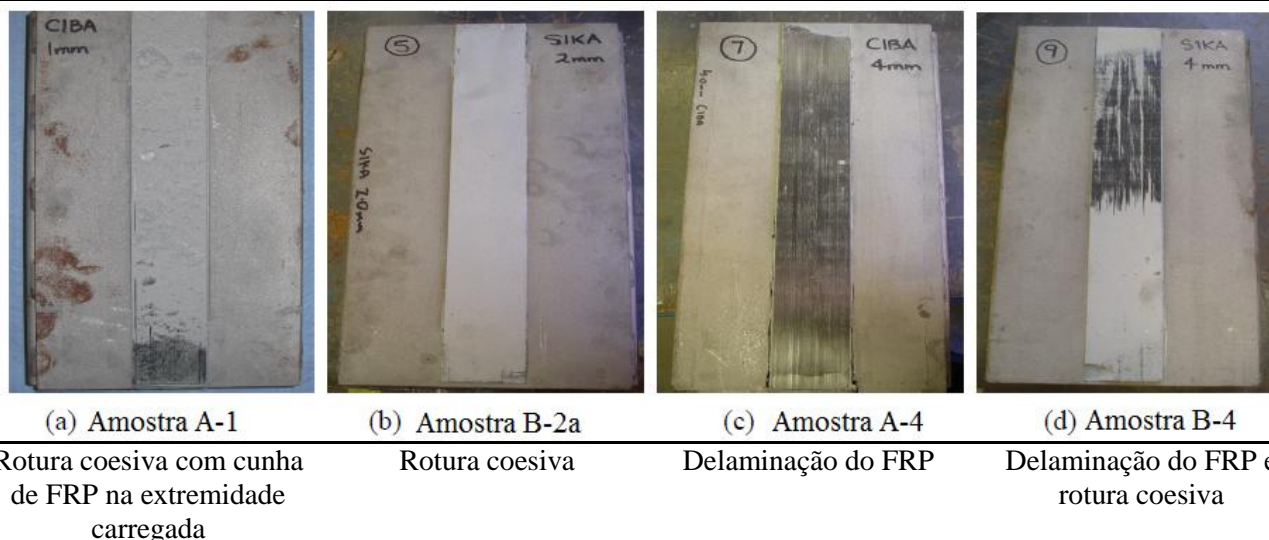


Figura 2.16 – Modos de fratura existentes [45].

O modo de fratura correspondente ao ensaio de corte simples é o modo II pois corresponde a deslocamentos relativos entre dois materiais, i.e. entre o FRP e o aço. Para a ligação FRP/aço as roturas visíveis são roturas coesivas da ligação FRP/aço e/ou delaminação do compósito de FRP ao longo da ligação, a Figura 1.2 da página 4 mostra uma esquematização do tipo de falhas. A Figura 2.17 mostra os vários tipos de rotura obtidos por Xia e Teng [27] nos ensaios experimentais de corte simples da ligação FRP/aço.



(a) Amostra A-1

(b) Amostra B-2a

(c) Amostra A-4

(d) Amostra B-4

Rotura coesiva com cunha de FRP na extremidade carregada

Rotura coesiva

Delaminação do FRP

Delaminação do FRP e rotura coesiva

Figura 2.17 – Tipos de roturas da ligação FRP/aço obtidas pelos ensaios de corte simples realizados por Xia e Teng [27] adotado

Para ensaios de corte simples com ancoragem mecânica a rotura da ligação FRP/aço é mais clara em relação aos ensaios de corte simples sem ancoragem mecânica. A rotura da ligação mais usual é a rotura do compósito de FRP [22].

2.10. Equações governativas da ligação FRP/substrato

Designando L_b como o comprimento colado, a ligação FRP/substrato é submetida a uma carga mecânica (F) em $x = L_b$. A extremidade oposta à carregada ($x = 0$) está livre de quaisquer cargas mecânicas e, por conseguinte, é designada como a extremidade livre do compósito de FRP. No caso de um sistema EBR, as considerações de equilíbrio do compósito de FRP (ver Figura 2.18) podem conduzir às equações fundamentais:

$$\frac{d\sigma_p(x)}{dx} - \frac{\tau(x)}{t_p} = 0 \quad (2.9)$$

$$\frac{d\sigma_s(x)}{dx} + \frac{\tau(x) \cdot b_p}{b_s \cdot t_s} = 0 \quad (2.10)$$

$$\sigma_p(x) \cdot b_p \cdot t_p + \sigma_s(x) \cdot b_s \cdot t_s = F \quad (2.11)$$

onde σ_p são as tensões longitudinais no FRP, σ_s são as tensões longitudinais no substrato, b_p e t_p são, respetivamente, a largura e espessura do FRP e b_s e t_s são a largura e espessura do substrato.

As tensões longitudinais no compósito de FRP e no substrato são, respetivamente:

$$\sigma_p(x) = E_p \cdot \frac{du_p(x)}{dx} \quad (2.12)$$

e

$$\sigma_s(x) = E_s \cdot \frac{du_s(x)}{dx} \quad (2.13)$$

onde E_p e E_s são, respetivamente, o módulo de elasticidade do FRP e do substrato; e du_p/dx e du_s/dx são, respetivamente, as extensões no compósito e no substrato devido às cargas transmitidas ao FRP. Os deslocamentos relativos (ou deslizamentos) entre o FRP e o substrato são determinados de acordo com:

$$s(x) = u_p(x) - u_s(x) \quad (2.14)$$

onde u_p e u_s são, respetivamente, os deslocamentos na fibra de FRP e no substrato.

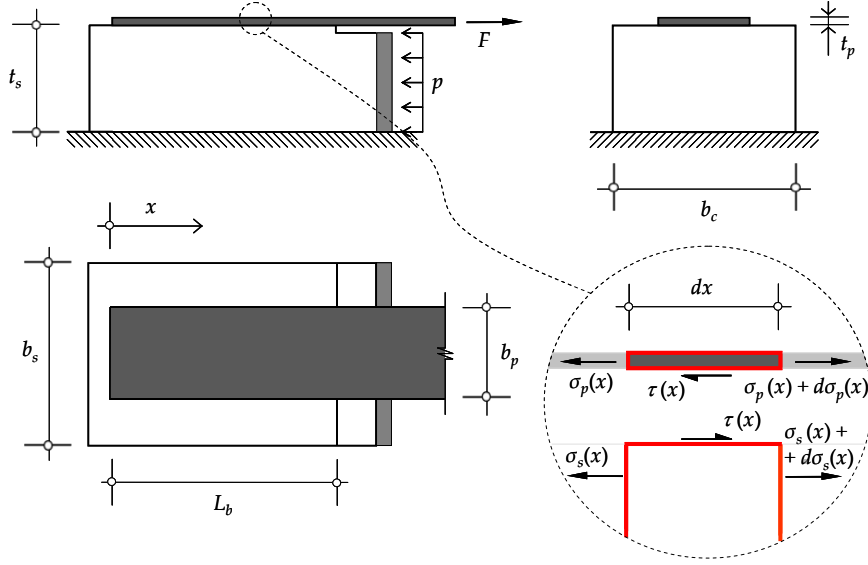


Figura 2.18 - Esquema de um teste de corte simples sem ancoragem mecânica [46].

Derivando a Eq. (2.14), em ordem a x :

$$\frac{ds(x)}{dx} = \varepsilon_p(x) - \varepsilon_s(x) \quad (2.15)$$

Substituindo as Eqs. (2.12) e (2.13) na Eq.(2.15) obtém-se:

$$\frac{ds(x)}{dx} = \frac{\sigma_p(x)}{E_p} - \frac{\sigma_s(x)}{E_s} \quad (2.16)$$

Derivando a Eq. (2.16), em ordem a x :

$$\frac{d^2s(x)}{dx^2} = \frac{1}{E_p} \cdot \frac{d\sigma_p(x)}{dx} - \frac{1}{E_s} \cdot \frac{d\sigma_s(x)}{dx} \quad (2.17)$$

Introduzindo as Eqs. (2.9) e (2.10) na Eq. (2.17), e assumindo que localmente a tensão de aderência é dependente dos deslocamentos relativos entre o FRP e o substrato, obtém-se a equação diferencial de segunda ordem:

$$\frac{d^2s(x)}{dx^2} - \lambda^2 \cdot \tau(x) = 0 \quad (2.18)$$

onde:

$$\lambda^2 = \frac{1}{E_p \cdot t_p} + \frac{b_p}{E_s \cdot b_s \cdot t_s} \quad (2.19)$$

Geralmente, $1/E_p t_p \gg b_p/(E_s b_s t_s)$ e assim, Eq. (2.19) fica:

$$\lambda^2 = \frac{1}{E_p \cdot t_p} \quad (2.20)$$

As tensões longitudinais no FRP podem ser determinadas através da introdução de Eq.(2.14) na Eq. (2.12) que conduz a:

$$\sigma_p(x) = \frac{1}{t_p \cdot \lambda^2} \cdot \frac{ds(x)}{dx} \quad (2.21)$$

A solução da Eq. (2.18) depende do modelo *bond-slip*. Para modelos *bond-slip* não lineares, a solução analítica da Eq. (2.18) torna-se difícil, sendo usadas estratégias numéricas (e.g. [11, 35, 19, 20, 22, 23, 24,26, 32-36,47]). Nas seções seguintes uma solução analítica da Eq. (2.18) é proposta na qual um modelo *bond-slip* exponencial é assumido.

2.11. Lei *bond-slip* exponencial

Vários modelos *bond-slip* foram reconhecidos na literatura, como já foi referido, a fim de estimar o desempenho da ligação FRP/substrato. A partir de várias experiências, por exemplo [11, 21, 23, 27, 29, 42, 47], o modelo *bond-slip* que representa o comportamento da ligação FRP/substrato é caracterizado por um ramo ascendente até ao valor da tensão de aderência máxima, seguindo-se um ramo descendente da ligação que reduz a tensão de aderência com os deslizamentos da ligação. Nestes modelos, as tensões de aderência tendem a diminuir com o aumento do deslizamento da ligação.

Um modelo de *bond-slip* que se ajusta às considerações feitas anteriormente é o modelo proposto por Dai *et al.* [29]. Neste modelo, a curva *bond-slip* da ligação FRP/substrato é determinada a partir da curva experimental extensão vs. deslizamento em $x = L_b$. Para esse efeito, uma curva analítica extensão vs. deslizamento é aproximada à curva obtida experimentalmente. A curva analítica extensão vs. deslizamento proposta por Dai *et al.* [29] é:

$$\varepsilon_p(s) = A \cdot (1 - e^{-Bs}) \quad (2.22)$$

onde A é a extensão máxima no compósito de FRP; e B é um índice de rigidez da ligação obtido do ajuste da Eq. (2.22) à curva experimental extensão vs. deslizamento.

O compósito de FRP tem um comportamento constitutivo linear, logo:

$$d\sigma_p(x) = E_p \cdot d\varepsilon_p \quad (2.23)$$

Introduzindo a Eq. (2.23) na Eq. (2.9), e reconhecendo que o comportamento local da interface é rígido por uma *bond-slip*, tem-se:

$$\tau(x) = E_p \cdot t_p \cdot \frac{d\varepsilon_p}{dx} \quad (2.24)$$

ou

$$\tau(s) = E_p \cdot t_p \cdot \frac{d\varepsilon_p}{ds} \cdot \frac{ds}{dx} \quad (2.25)$$

Derivando a Eq. (2.22) em ordem a s e introduzindo na Eq. (2.25), a curva *bond-slip* exponencial é determinada de acordo com:

$$\tau(s) = E_p \cdot t_p \cdot A^2 \cdot B \cdot e^{-Bs} \cdot (1 - e^{-Bs}) \quad (2.26)$$

A energia de fratura Modo II é calculada de acordo com:

$$G_f = \int_0^\infty \tau(s) \cdot ds = E_p \cdot t_p \cdot A^2 \cdot B \cdot \int_0^\infty e^{-Bs} \cdot (1 - e^{-Bs}) ds \quad (2.27)$$

Resulta da Eq. (2.27) a energia de fratura, que é:

$$G_f = 0.5 \cdot A^2 \cdot E_p \cdot t_p \quad (2.28)$$

e, por conseguinte:

$$A = \sqrt{\frac{2G_f}{E_p \cdot t_p}} \quad (2.29)$$

Das Eqs. (2.28) e (2.29), a tensão de aderência definida na Eq. (2.26) pode ser reescrita como:

$$\tau(s) = 2B \cdot G_f \cdot (e^{-B \cdot s} - e^{-2B \cdot s}) \quad (2.30)$$

O deslizamento correspondente à tensão de aderência máxima é determinado a partir da derivada da Eq. (2.30) em ordem a s e igualando a zero, que conduz a:

$$s_{\max} = \frac{\ln(2)}{B} \quad (2.31)$$

Substituindo a Eq. (2.31) na Eq. (2.30), a tensão de aderência máxima é determinada de acordo com:

$$\tau_{\max} = 0.5B \cdot G_f \quad (2.32)$$

ou pela Eq. (2.5) descrita anteriormente.

2.12. Fatores que influenciam a ligação FRP/substrato

O desempenho da interface reforço/substrato é influenciado por fatores entre os quais se incluem as características dos materiais envolvidos na ligação. Alguns autores investigaram os seguintes fatores: variação do comprimento colado da ligação; largura do FRP; espessura do FRP; rigidez do FRP; espessura e tipo de resina epoxídica; resistência do material usado na concepção do provete; preparação da superfície colada.

Grelle, Chastre, Marta, Tamon, entre outros, concluíram que as características mecânicas dos provetes influenciam o desempenho do conjunto da ligação [16,51,52-55]. Relativamente à preparação da superfície colada do elemento estrutural, a classe do aço não influencia o desempenho da ligação FRP/aço, pois os elementos mais fracos da ligação são sempre a resina epoxídica e/ou o compósito de FRP [27].

Segundo Biscaia [28,45] a preparação/não preparação da superfície pode alterar significativamente as tensões de aderência máximas da ligação FRP/substrato. A preparação da superfície do elemento a recuperar, executado previamente à colagem do material de reforço, tem como finalidade aumentar a superfície de colagem com o aumento da sua rugosidade. Assim, ao aumentar-se a área de contato entre o FRP e o elemento reforçado espera-se que a resistência da ligação aumente. Jiang [2] confirmou que o pré-tratamento superficial pode melhorar a qualidade de ligação entre o substrato, o FRP e a camada adesiva.

Existem métodos de preparação da superfície do substrato, de entre os quais se destacam o jacto de areia, o martelo de agulhas, a picagem da superfície com bujarda ou a decapagem com recurso a um esmóril [45].

Analogamente à utilização dada aos varões de aço de armaduras ordinárias em estruturas de betão armado, os compósitos de FRP passaram de lisos a nervurados. Nesse sentido, os compósitos de FRP com a presença destas nervuras na sua superfície desempenham, de igual forma, um papel significativo no melhoramento do desempenho da ligação FRP/substrato. No caso do material de reforço ter uma superfície lisa, as tensões de aderência máximas apresentam 10 a 20% a menos, em comparação com o caso em que tenha nervuras [52, 55].

Alguns autores fizeram variar a rigidez do FRP e verificaram que esta contribui para um aumento da força máxima da ligação [6, 28,49], sendo, este aumento, diretamente proporcional à força máxima transmitida ao FRP. As dimensões do material colado, quer seja um compósito de FRP quer seja uma chapa metálica, influenciam a ligação [6,51,52,55].

A resina é responsável pela ligação do FR/substrato, garantindo que o conjunto desempenhe um bom comportamento com uma eficaz transferência de tensões de corte entre os elementos colados. Quanto maior for o módulo de elasticidade do adesivo, mais elevada é a rigidez do adesivo levando a uma ligação rígida e a uma forte conexão [45, 51].

Yu *et al.* [62] estudou, também, a influência da rigidez da resina epoxídica na ligação FRP/aço, usou quatro tipos de resinas diferentes como a Tabela 2.2 mostra.

Tabela 2.2 – Características das resinas epoxídicas usadas por T.Yu *et al.* [62]

Adesivo	Módulo de Elasticidade, E (GPa)	Tensão aderência σ_{\max} (MPa)	Extensão última, ε_u
A (Sika 30)	11.25	22.34	0.0030
B (Sika 330)	4.82	31.28	0.0075
C (Araldite 2015)	1.75	14.73	0.0151
D (Araldite 420)	1.83	21.46	0.0289

As curvas extensão vs tensão dos diferentes tipos de resina utilizadas por T.Yu *et al.* [62] estão representadas na Figura 2.19.

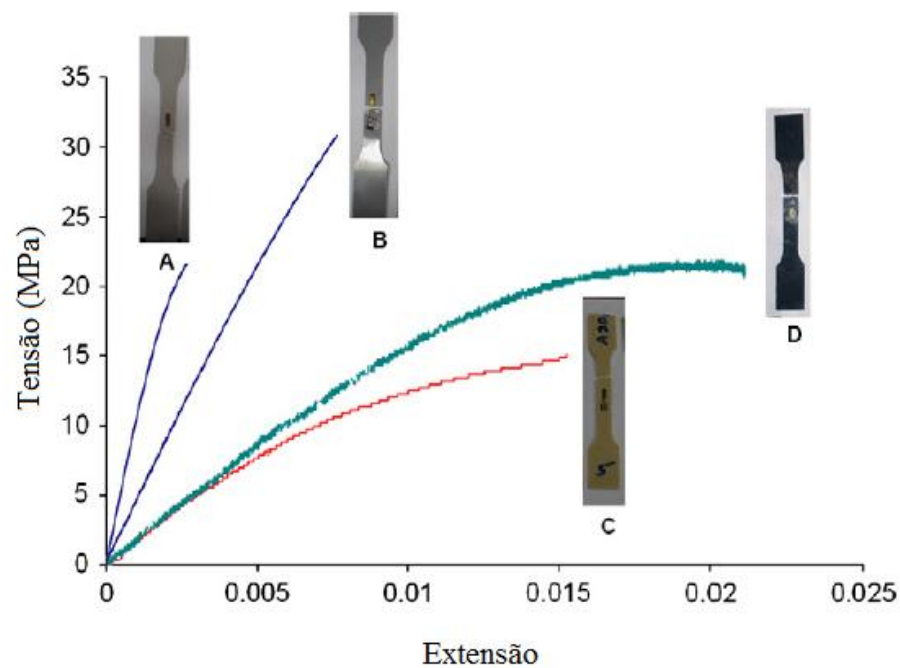


Figura 2.19 – Curvas extensão vs. tensão dos diferentes tipos de resina usadas por T.Yu et al. [62]

A partir da Figura 2.20 e Tabela 2.3 conclui-se que o módulo de elasticidade do adesivo influencia a ligação FRP/aço. O adesivo A é o que apresenta maior módulo de elasticidade e portanto é a ligação mais rígida dos ensaios, o que leva a ligação FRP/aço à rotura para um deslizamento muito menor e, também, para uma força menor do que os restantes adesivos.

Tabela 2.3 – Características do adesivo e FRP usados por T.Yu et al. [62]

Tipo de adesivo	t_a (mm)	E_p (GPa)	t_p (mm)	$P_{u,exp}$ (kN)
A	1.07	150	1.2	30.75
A	1.03	150	1.2	31.21
B	1.02	150	1.2	67.76
B	1.04	150	1.2	62.49
C	0.99	150	1.2	112.87
C	1.02	150	1.2	113.81
D	1.01	150	1.2	106.42
D	1.03	150	1.2	113.62

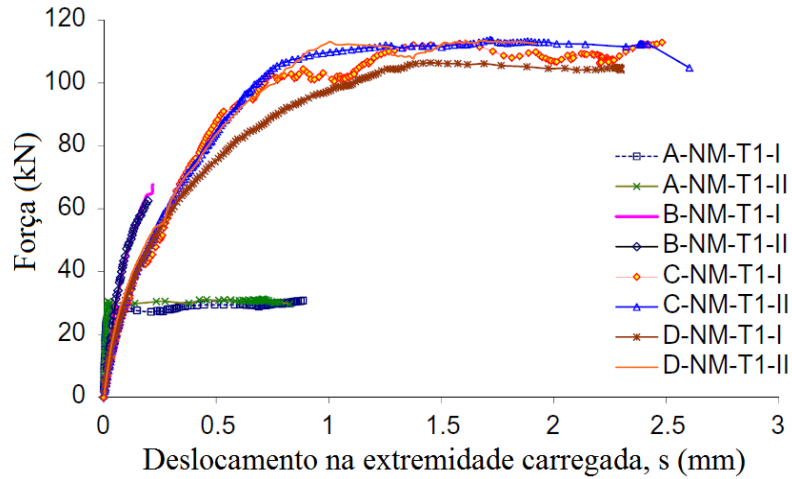


Figura 2.20 – Curva força vs. deslizamento na extremidade carregada da ligação FRP/aço feita por T.Yu et al. [62]

Comparando a fixação com resina à fixação com parafusos verifica-se que a resina reduz o tempo de construção, economiza peso, não necessita de fixadores, e a transferência de carga é mais uniforme. Ligações aparafusadas geralmente resultam em concentrações de tensões muito mais elevadas onde ocorrem fendas, enquanto a ligação adesiva torna as tensões uniformes em todo o compósito de FRP [43].

O comprimento efetivo da ligação corresponde ao comprimento de colagem a partir da qual não é possível transmitir mais força ao compósito de FRP. Assim o comprimento efetivo e a força máxima transmitida ao reforço estão interligados. Vários autores expuseram expressões que devolvem respostas concretas às perguntas dos projetistas e que determinam a força máxima transmitida ao compósito de FRP para a técnica EBR. A expressão base para determinar a força máxima é dada por:

$$F_{m\acute{a}x} = b_p \sqrt{2G_f \cdot E_p \cdot t_p} \quad (2.33)$$

onde b_p , t_p e E_p são, respetivamente, a largura, a espessura e o módulo de elasticidade do compósito de FRP, enquanto G_f é a energia de fratura da ligação FRP/substrato.

Apresentam-se algumas propostas para a determinação da força máxima transmitida ao FRP, desenvolvidas por Ueda e Dai [41] em estudos e trabalhos. Observando as diferentes expressões de estimar a força máxima transmitida ao compósito, constata-se que esta é diretamente proporcional à energia de fratura para a ligação FRP/aço.

Tabela 2.4 – Propostas de expressões de força máxima transmitida

Autores	Expressão	Observações
Ueda e Dai [41]	$F_{m\acute{a}x} = \begin{cases} b_p \sqrt{2G_f \cdot E_p \cdot t_p} \\ (b_p + 2\Delta b_p) \cdot \sqrt{2G_f \cdot E_p \cdot t_p} \end{cases}$	$\Delta b_p = 3.7 \text{ mm}$ Os autores pretendem com este parâmetro contabilizar o efeito da largura do FRP sobre a área do provete efetivamente mobilizada.
CNR-DT 200/04 Itália [63]	$F_{m\acute{a}x} = \frac{1}{\gamma_{f,d} \cdot \sqrt{\gamma_c}} b_p \sqrt{2G_f \cdot E_p \cdot t_p}$	$\gamma_{f,d}$ e γ_c são coeficientes de segurança. [63]

O comprimento efetivo da ligação entre o FRP e o substrato também pode ser determinado a partir da força transmitida ao compósito, como se pode analisar em 3.2.4. Biscaia et al. [28] determinou uma expressão que tem em consideração o deslizamento último, s_{ult} . Verificou assim que s_{ult} influencia o comprimento efetivo da ligação, estabelecendo uma relação de proporcionalidade direta dada por:

$$L_{eff} = k \cdot s_{ult} \sqrt{\frac{E_p t_p}{G_f}} \quad (2.34)$$

onde $k=1,32$ obtido a partir dos vários ensaios experimentalmente. Nesta expressão, é possível verificar que com o aumento da energia de fratura o comprimento de transferência diminui.

Capítulo 3

Modelo analítico proposto

3.1.Introdução

Vários estudos [8,11,20,29,34,35,36,37] têm desenvolvido modelos para estudar o comportamento adesivo da ligação substrato com FRP. Os modelos, usados até agora, são modelos numéricos e alguns modelos analíticos [29]. Viegas [34] e Teixeira [36] discretizaram a ligação entre o betão e o FRP usando modelos numéricos, obtendo resultados próximos do previsto experimentalmente. Dai *et al* [29] determinaram um modelo analítico não linear capaz de produzir o comportamento da interface do substrato com o FRP até à rotura, no entanto funciona apenas para comprimentos colados longos ($L_b > L_{eff}$). A expressão de deslizamentos ao longo do comprimento colado determinada por Dai *et al.* [9][29] é dada por:

$$s(x) = \frac{s_{max}}{\ln(2)} \cdot \ln(e^{\frac{\ln(2)}{s_{max}}(Ax+C)} + 1) \quad (3.1)$$

onde A é a extensão máxima, s_{max} é o deslizamento correspondente à tensão de aderência máxima e a constante C é:

$$C = \frac{s_{max}}{\ln(2)} \cdot \ln\left(\frac{\frac{F}{b_f \cdot E_f \cdot t_f}}{A - \frac{F}{b_f \cdot E_f \cdot t_f}}\right) - A \cdot L \quad (3.2)$$

Verificando-se que a constante C depende do valor de força, F , do comprimento colado, L_b , da extensão máxima, A , do deslizamento correspondente à tensão de aderência máxima, s_{max} , e das propriedades do material FRP. Retira-se que os valores de deslizamento são controlados pelo valor da força dependendo da lei *bond-slip*.

Determinou-se, assim, modelos analíticos exactos não lineares para representar o comportamento da interface do substrato com o FRP. Em seguida demonstram-se esses modelos analíticos para dois casos diferentes: modelo analítico sem ancoragem mecânica e modelo analítico com ancoragem mecânica. Estes modelos não dependem da força, não são limitados em termos de comprimento colado e reproduzem todo o comportamento da ligação, até mesmo após colapso da ligação do FRP/substrato.

3.2. Corte simples sem ancoragem mecânica

3.2.1. Enquadramento teórico

Com o modelo *bond-slip* definido, a Eq. (2.18) pode ser resolvida para determinar o deslizamento, as extensões no compósito FRP, a tensão aderência na interface e a resposta da carga vs. deslizamento. Desta forma, a introdução da Eq. (2.30) na Eq. (2.18) leva a:

$$\frac{d^2 s(x)}{dx^2} - \frac{2B \cdot G_f}{t_p} \cdot \left(\frac{1}{E_p} + \frac{b_p \cdot t_p}{E_s \cdot t_s \cdot b_s} \right) \cdot (e^{-B \cdot s} - e^{-2B \cdot s}) = 0 \quad (3.3)$$

reconhecendo que:

$$\frac{d^2 s(x)}{dx^2} = \frac{d}{dx} \left(\frac{ds}{dx} \right) = \frac{d}{ds} \left(\frac{ds}{dx} \right) \frac{ds}{dx} = \frac{1}{2} \cdot \frac{d}{ds} \left(\frac{ds}{dx} \right)^2 \quad (3.4)$$

e introduzindo na Eq. (3.3) leva a:

$$\left(\frac{ds}{dx} \right)^2 = \int \frac{4B \cdot G_f}{t_p} \cdot \left(\frac{1}{E_p} + \frac{b_p \cdot t_p}{E_s \cdot t_s \cdot b_s} \right) \cdot (e^{-B \cdot s} - e^{-2B \cdot s}) ds \quad (3.5)$$

Integrando Eq. (3.5) resulta:

$$\frac{ds}{dx} = \sqrt{\frac{2G_f}{t_p} \cdot \left(\frac{1}{E_p} + \frac{b_p \cdot t_p}{E_s \cdot t_s \cdot b_s} \right) \cdot (1 - e^{-B \cdot s})^2 + C_1} \quad (3.6)$$

em que C_1 é uma constante que é determinada a partir das condições de fronteira do problema. Assim, sabendo que a extremidade livre do compósito FRP está livre de tensões de aderência e o deslizamento é designado por s_0 , as condições de fronteira definem-se de acordo com:

$$\varepsilon(x=0) = \frac{ds(x=0)}{dx} = 0 \quad (3.7)$$

e

$$s(x=0) = s_0 \quad (3.8)$$

A partir das condições de fronteira, a constante C_1 é dada por:

$$C_1 = -D^2 \cdot (1 - e^{-B \cdot s_0})^2 \quad (3.9)$$

onde

$$D = \sqrt{\frac{2G_f}{t_p} \cdot \left(\frac{1}{E_p} + \frac{b_p \cdot t_p}{E_s \cdot t_s \cdot b_s} \right)} \quad (3.10)$$

Note-se que $1/E_p \gg b_p t_p / (E_s b_s t_s)$ e assim, a Eq. (3.10) é equivalente à Eq. (2.29), isto é, $A = D$. Além disso, a Eq. (3.6) pode ser reescrita de acordo com:

$$\int \frac{ds}{\sqrt{(1 - e^{-B \cdot s})^2 - (1 - e^{-B \cdot s_0})^2}} = \int D dx \quad (3.11)$$

Resolvendo a Eq. (3.11) leva a:

$$\begin{aligned} & \frac{\ln \left[2 \cdot \sqrt{1 - (1 - e^{-B \cdot s_0})^2} \cdot \sqrt{(1 - e^{-B \cdot s})^2 - (1 - e^{-B \cdot s_0})^2} \cdot e^{-B \cdot s} + 2 \cdot \left[1 - (1 - e^{-B \cdot s_0})^2 \right] \cdot e^{B \cdot s} - 2 \right]}{B \cdot \sqrt{1 - (1 - e^{-B \cdot s_0})^2}} = \\ & = D \cdot x + C_2 \end{aligned} \quad (3.12)$$

em que C_2 é uma constante. Para resolução analítica considerou-se que a segunda raiz quadrada da Eq. (3.12) pode ser aproximada para:

$$\left(1 - e^{-B \cdot s}\right)^2 - \left(1 - e^{-B \cdot s_0}\right)^2 \approx \left(1 - e^{-B \cdot s}\right)^2 \quad (3.13)$$

o deslizamento ao longo do comprimento colado é dado por:

$$s(x) = \frac{1}{B} \cdot \ln \left[\frac{e^{\left(D \cdot x + C_2 \right) \left(B \cdot \sqrt{1 - \left(1 - e^{-B \cdot s_0} \right)^2} \right)} + 2 + 2 \cdot \sqrt{1 - \left(1 - e^{-B \cdot s_0} \right)^2}}{2 \cdot \sqrt{1 - \left(1 - e^{-B \cdot s_0} \right)^2} + 2 \cdot \left[1 - \left(1 - e^{-B \cdot s_0} \right)^2 \right]} \right] \quad (3.14)$$

A constante C_2 da Eq. (3.14) é então determinada pela introdução da condição de fronteira da Eq. (3.7) na Eq. (3.14) que leva a:

$$C_2 = \frac{\ln \left[e^{B \cdot s_0} \cdot \left(2 \cdot \sqrt{1 - \left(1 - e^{-B \cdot s_0} \right)^2} + 2 \cdot \left(1 - \left(1 - e^{-B \cdot s_0} \right)^2 \right) \right) - 2 - 2 \cdot \sqrt{1 - \left(1 - e^{-B \cdot s_0} \right)^2} \right]}{B \cdot \sqrt{1 - \left(1 - e^{-B \cdot s_0} \right)^2}} \quad (3.15)$$

O deslizamento em $x=0$, s_0 , pode assim tomar qualquer valor, excepto zero.

Sabendo que as extensões no compósito de FRP são muito maiores do que as extensões no substrato [11, 24, 26, 28, 29, 34, 35, 36], pode-se determinar a partir da Eq. (3.6) a extensão no FRP de acordo com:

$$\frac{ds}{dx} = \varepsilon(x) = D \cdot \sqrt{\left(1 - \frac{2 \cdot \sqrt{1 - \left(1 - e^{-B \cdot s_0} \right)^2} + 2 \cdot \left[1 - \left(1 - e^{-B \cdot s_0} \right)^2 \right]}{e^{\left(D \cdot x + C_2 \right) \left(B \cdot \sqrt{1 - \left(1 - e^{-B \cdot s_0} \right)^2} \right)} + 2 + 2 \cdot \sqrt{1 - \left(1 - e^{-B \cdot s_0} \right)^2}} \right)^2 - \left(1 - e^{-B \cdot s_0} \right)^2} \quad (3.16)$$

A tensão de aderência ao longo do comprimento colado é determinada a partir do modelo *bond-slip*, introduzindo a Eq. (3.14) na Eq. (2.30) resulta:

$$\tau(x) = 2B \cdot G_f \cdot \frac{2 \cdot \sqrt{1 - (1 - e^{-B \cdot s_0})^2} + 2 \cdot [1 - (1 - e^{-B \cdot s_0})^2]}{e^{\frac{(D \cdot x + C_2) \left(B \cdot \sqrt{1 - (1 - e^{-B \cdot s_0})^2} \right)}{2 + 2 \cdot \sqrt{1 - (1 - e^{-B \cdot s_0})^2}}}} \times \left(1 - \frac{2 \cdot \sqrt{1 - (1 - e^{-B \cdot s_0})^2} + 2 \cdot [1 - (1 - e^{-B \cdot s_0})^2]}{e^{\frac{(D \cdot x + C_2) \left(B \cdot \sqrt{1 - (1 - e^{-B \cdot s_0})^2} \right)}{2 + 2 \cdot \sqrt{1 - (1 - e^{-B \cdot s_0})^2}}}} \right) \quad (3.17)$$

3.2.2. Carga máxima transmitida ao compósito FRP

Dois casos devem ser considerados para o comprimento colado: (i) o comprimento colado menor do que o comprimento efetivo da ligação ($L_b < L_{eff}$); (ii) o comprimento colado igual ou maior do que o comprimento efetivo da ligação ($L_b \geq L_{eff}$). É reconhecido na literatura (e.g. [11,19, 20, 24, 47]) que a carga máxima transmitida ao compósito de FRP é atingida no segundo caso, $L_b \geq L_{eff}$. Em tal circunstância, e assumindo um comprimento colado infinito, a carga máxima transmitida ao compósito de FRP pode ser determinada a partir da Eq. (3.16). Nesta expressão o deslizamento em $x = 0$ deve ser zero, $s_0 = 0$, e ao mesmo tempo, para um comprimento colado a tender para infinito ($x \rightarrow \infty$), a raiz quadrada da Eq. (3.16) toma valor unitário. Assim, a carga máxima transmitida ao compósito de FRP é:

$$F_{max} = b_p \cdot \sqrt{2G_f \cdot \left(E_p \cdot t_p + \frac{E_p^2 \cdot b_p \cdot t_p^2}{E_s \cdot t_s \cdot b_s} \right)} \quad (3.18)$$

Aceitando que $(E_p \cdot t_p) \gg (E_p^2 \cdot b_p \cdot t_p^2) / (E_s \cdot t_s \cdot b_s)$, a Eq. (3.18) pode ser reescrita de acordo com:

$$F_{max} = b_p \cdot \sqrt{2G_f \cdot E_p \cdot t_p} \quad (3.19)$$

A Eq. (3.19) é vulgarmente usada na literatura [11, 20, 22, 28, 29] para estimar a força máxima da interface do FRP com o substrato.

No caso de um comprimento colado curto ($L_b < L_{eff}$), é comum a carga máxima transmitida para o compósito de FRP ser afectada por um fator β_L . Este fator tem sido objeto de estudo, originando propostas que podem ser encontradas na literatura [11], [24], [58], [59]. Para os

sistemas EBR, β_L pode ser determinado a partir da Eq. (3.16) para qualquer comprimento colado, ou seja, para $x = L_b$, assumindo um comportamento linear e elástico constitutivo do compósito de FRP. Assim, a força máxima transmitida ao FRP é:

$$F_{\max} = \beta_L \cdot b_p \cdot \sqrt{2G_f \cdot E_p \cdot t_p} \quad (3.20)$$

onde:

$$\beta_L = \sqrt{\left(1 - \frac{2 \cdot \sqrt{1 - (1 - e^{-B \cdot s_0})^2} + 2 \cdot [1 - (1 - e^{-B \cdot s_0})^2]}{e^{\frac{(D \cdot L_b + C_2) \cdot (B \cdot \sqrt{1 - (1 - e^{-B \cdot s_0})^2})}{2} + 2 + 2 \cdot \sqrt{1 - (1 - e^{-B \cdot s_0})^2}}} \right)^2 - (1 - e^{-B \cdot s_0})^2} \quad (3.21)$$

3.2.3. Curva carga vs. deslizamento

A formulação analítica apresentada nas seções anteriores permite descrever o comportamento total do descolamento da ligação do FRP com o substrato. Reproduz as diferentes fases da ligação durante o pré e pós-colapso da interface do FRP com o substrato. Portanto, deslizamentos, extensões no compósito FRP, distribuição de tensões ao longo da interface em várias fases e curva carga vs. deslizamento no pré e pós-colapso podem ser obtidos a partir deste modelo analítico agora proposto. A curva carga vs. deslizamento é determinada a partir da Eq. (3.16), assumindo que o compósito de FRP tem um comportamento linear e elástico constitutivo, conduzindo:

$$\begin{aligned} F(x = L_b) &= \varepsilon(x = L_b) \cdot E_p \cdot t_p \cdot b_p = \\ &= E_p \cdot t_p \cdot b_p \cdot D \cdot \sqrt{\left(1 - \frac{2 \cdot \sqrt{1 - (1 - e^{-B \cdot s_0})^2} + 2 \cdot [1 - (1 - e^{-B \cdot s_0})^2]}{e^{\frac{(D \cdot L_b + C_2) \cdot (B \cdot \sqrt{1 - (1 - e^{-B \cdot s_0})^2})}{2} + 2 + 2 \cdot \sqrt{1 - (1 - e^{-B \cdot s_0})^2}}} \right)^2 - (1 - e^{-B \cdot s_0})^2} \end{aligned} \quad (3.22)$$

Por outro lado, o deslizamento em $x = L_b$ é determinado a partir da Eq. (3.14) que conduz a:

$$s(x = L_b) = \frac{1}{B} \cdot \ln \left[\frac{e^{\frac{(D \cdot L_b + C_2) \cdot (B \cdot \sqrt{1 - (1 - e^{-B \cdot s_0})^2})}{2} + 2 + 2 \cdot \sqrt{1 - (1 - e^{-B \cdot s_0})^2}}}{2 \cdot \sqrt{1 - (1 - e^{-B \cdot s_0})^2} + 2 \cdot [1 - (1 - e^{-B \cdot s_0})^2]} \right] \quad (3.23)$$

3.2.4. Comprimento efetivo da ligação

De acordo com Xia e Teng [27], o comprimento efetivo da ligação entre um compósito de FRP e o aço é calculado a partir de:

$$L_{eff} = \frac{\pi}{2} \cdot s_{ult} \cdot \sqrt{\frac{E_p \cdot t_p}{2G_f}} \quad (3.24)$$

onde s_{ult} é o deslizamento a partir do qual a interface descola. A Eq. (3.24) é obtida com base num modelo *bond-slip* rígido com amolecimento linear conforme demonstrado por Biscaia *et al.* [28] e que é na realidade, uma aproximação para a curva de *bond-slip* não linear observado experimentalmente por Xia e Teng [27]. Esses autores também assumiram que o deslizamento máximo (s_{max}) é muito menor do que o deslizamento final (s_{ult}).

Num teste de corte simples, sem qualquer sistema de fixação mecânico adicional, o comprimento efetivo da ligação (L_{eff}) é definido como o comprimento a partir do qual a carga transmitida para o compósito FRP não aumenta.

Nesse sentido, uma possibilidade para identificar L_{eff} basta determinar a carga máxima transmitida ao compósito de FRP para vários comprimentos colados, isto é, através da elaboração de um gráfico de carga máxima vs. comprimento colado como mostrado na Figura 3.1 a). Nesta figura, i.e., para valores de B aproximadamente $13,0 \text{ mm}^{-1}$ e A de 0,36% verifica-se que o comprimento efetivo encontra-se entre os 100 mm e os 150 mm, pois a carga máxima é atingida nesse intervalo.

A curva tensão aderência ao longo do comprimento colado também permite identificar o comprimento efetivo da ligação [11, 23]. Em qualquer caso, esta análise deve ser sempre feita para comprimentos colados longos ($L_b \geq L_{eff}$).

Portanto e do ponto de vista da formulação teórica apresentada anteriormente, a determinação do comprimento efetivo da ligação pode ser resolvido, assumindo que em $x = L_{eff}$ o deslizamento corresponde à iniciação de descolamento (s_{ult}) e, ao mesmo tempo, o deslizamento em $x = 0$ é aproximadamente zero. Igualando Eq. (3.14) a s_{ult} para $x = L_{eff}$ e sabendo que $s_0 = 0$, o comprimento efetivo da ligação é:

$$L_{eff} = \frac{1}{D \cdot B} \ln[4 \cdot (e^{B \cdot s_{ult}} - 1)] - \frac{C_2}{D} \quad (3.25)$$

onde D é a extensão máxima da ligação CFRP com o aço e é definido de acordo com a Eq. (3.10) sendo a constante C_2 definida de acordo com a Eq. (3.15). O deslizamento último (s_{ult}) é,

novamente, o deslizamento a partir do qual a interface descola e B é o índice de rigidez da ligação FRP/aço obtido experimentalmente e ajustável à curva extensão vs. deslizamento.

A Figura 3.1 realça o processo de descolamento completo da ligação entre o FRP e o substrato para diferentes comprimentos colados: $L_b = 25$ mm (ponto A), 50 mm (ponto B), 75 mm (Ponto C), 100 mm (ponto D), de 150 mm (ponto E), e 200 mm (ponto F).

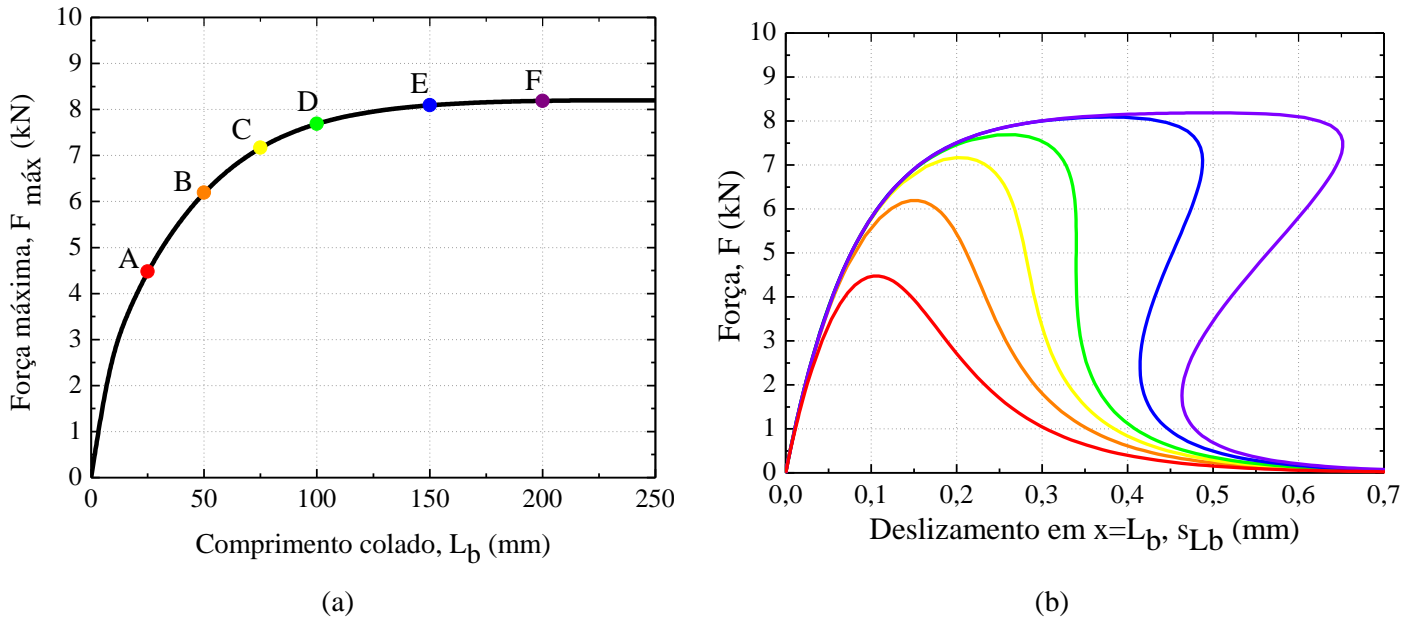


Figura 3.1 - Determinação do comprimento efetivo da ligação a partir de: (a) curva carga máxima vs. comprimento colados e (b) curvas força vs deslizamento da interface entre o CFRP e o aço.

A Figura 3.2 mostra que quando o comprimento colado é curto, a relação entre os deslizamentos em $x = 0$ e $x = L_b$ é monotónica. Por conseguinte, um aumento de deslizamento na extremidade carregada do compósito de FRP irá sempre provocar um aumento do deslizamento na extremidade livre do compósito de FRP.

Quando o comprimento colado é maior do que o comprimento efetivo da ligação, a relação monotónica é perdida e um aumento do deslizamento na extremidade livre do compósito de FRP é observado, o que corresponde a uma redução do deslizamento na extremidade carregada do compósito de FRP. Por conseguinte, fenómeno de *snap-back* ocorre durante o pós-colapso da interface do FRP com o aço.

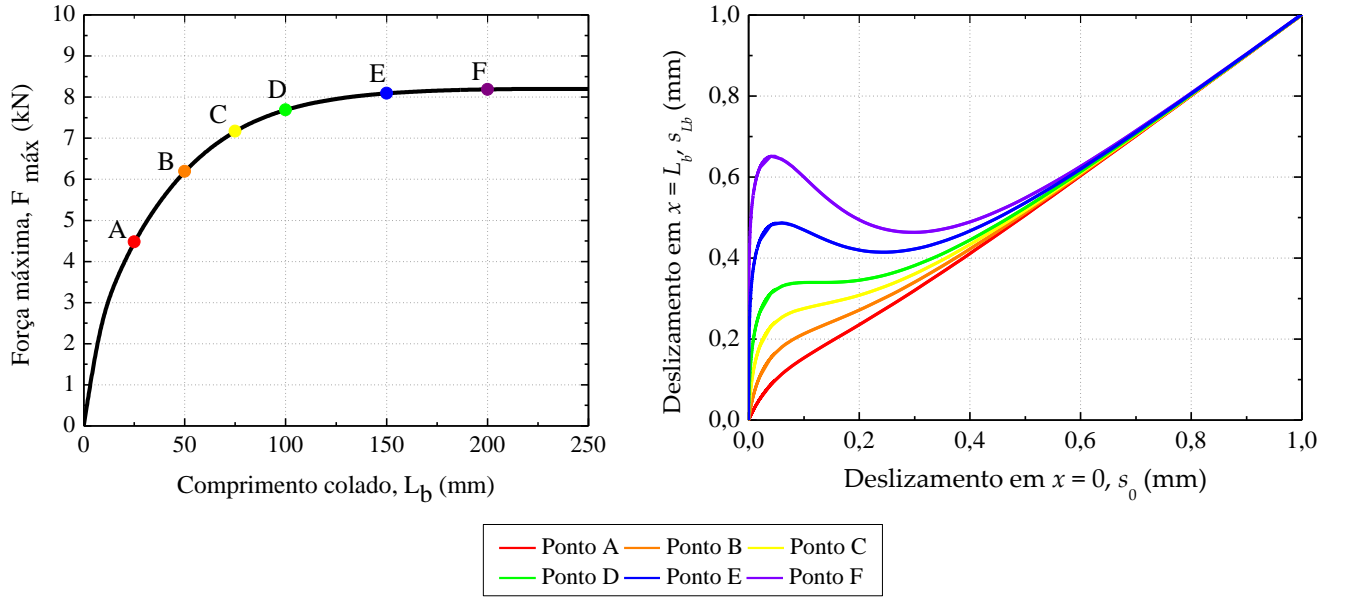


Figura 3.2 – Relação entre os deslocamentos da extremidade livre com a extremidade carregada

3.2.5. Forças no substrato

A partir da Eq. (2.10), da expressão das tensões de aderência (2.26) e da expressão do deslizamento (3.14) determina-se a expressão das tensões no substrato ao longo do comprimento colado. Isolando as tensões no substrato, $\sigma_s(x)$, da Eq. (2.10), fica:

$$\sigma_s(x) = -\frac{b_f}{t_s \cdot b_s} \int_0^{L_b} \tau(x) dx \quad (3.26)$$

Substituindo a equação das tensões de aderência (2.26) na Eq. (3.26) resulta:

$$\sigma_s(x) = -\frac{E_f \cdot t_f b_f}{t_s \cdot b_s} \cdot D^2 \cdot B \int_0^{L_b} (e^{-B \cdot s(x)} - e^{-2 \cdot B \cdot s(x)}) dx \quad (3.27)$$

Usando a Eq. (3.14) e simplificando de acordo com:

$$f(B, s_0) = 2\sqrt{1 - (1 - e^{-B \cdot s_0})^2} + 2 \cdot [1 - (1 - e^{-B \cdot s_0})^2] \quad (3.28)$$

$$g(B, s_0) = B \cdot \sqrt{1 - (1 - e^{-B \cdot s_0})^2} \quad (3.29)$$

$$h(B, s_0) = 2 + 2\sqrt{1 - (1 - e^{-B.s_0})^2} \quad (3.30)$$

Ao realizar-se a integração da Eq. (3.27) obtém-se:

$$\sigma_s(x) = -\frac{E_f t_f b_f}{t_s \cdot b_s} \cdot D^2 \cdot B \left[f \cdot \left(\frac{x}{h} - \frac{\ln(e^{-C_2 \cdot g} \cdot (e^{g \cdot (D \cdot x + C_2)} + h))}{D \cdot h \cdot g} \right) - f^2 \cdot \left(-\frac{\ln(e^{g \cdot (D \cdot x + C_2)} + H)}{D \cdot h^2 \cdot g} + \frac{1}{D \cdot g \cdot (h \cdot e^{g \cdot (D \cdot x + C_2)} + h^2)} + \frac{D \cdot x + C_2}{D \cdot h^2} \right) + C_4 \right] \quad (3.31)$$

onde D é a extensão máxima no compósito de FRP. Admitindo que as tensões no substrato na extremidade carregada, $x = L_b$, são nulas, a constante C_2 é dada pela expressão (3.15) e a constante C_4 determina-se de acordo com:

$$C_4 = -f \left[\left(\frac{L_b}{h} - \frac{\ln(e^{-C_2 \cdot g} \cdot (e^{g \cdot (D \cdot L_b + C_2)} + H))}{D \cdot h \cdot g} \right) - f \cdot \left(-\frac{\ln(e^{g \cdot (D \cdot L_b + C_2)} + h)}{D \cdot h^2 \cdot g} + \frac{1}{D \cdot g \cdot (h \cdot e^{g \cdot (D \cdot L_b + C_2)} + h^2)} + \frac{D \cdot L_b + C_2}{D \cdot h^2} \right) \right] \quad (3.32)$$

A partir da expressão das tensões no aço, σ_s , a força no aço, F_s , é:

$$\sigma_s(x) = \frac{F_s}{t_s \cdot b_s} \quad (3.33)$$

onde t_s, b_s são, respetivamente, a espessura e a largura do aço.

As tensões máximas no substrato ocorrem na extremidade livre e são obtidas a partir da Eq. (3.55) para $x = 0$ obtendo-se:

$$\sigma_s(x=0) = -\frac{E_f t_f b_f}{t_s \cdot b_s} \cdot D^2 \cdot B \cdot f \left[\left(\frac{\ln(1 + h \cdot e^{-C_2 \cdot g})}{D \cdot h \cdot g} \right) - f \cdot \left(-\frac{\ln(e^{g \cdot C_2} + h)}{D \cdot h^2 \cdot g} + \frac{1}{D \cdot g \cdot (h \cdot e^{g \cdot C_2} + h^2)} + \frac{C_2}{D \cdot h^2} \right) - \left(\frac{L_b}{h} - \frac{\ln(e^{-C_2 \cdot g} \cdot (e^{g \cdot (D \cdot L_b + C_2)} + h))}{D \cdot h \cdot g} \right) + F \cdot \left(-\frac{\ln(e^{g \cdot (D \cdot L_b + C_2)} + h)}{D \cdot h^2 \cdot g} + \frac{1}{D \cdot g \cdot (h \cdot e^{g \cdot (D \cdot L_b + C_2)} + h^2)} + \frac{D \cdot L_b + C_2}{D \cdot h^2} \right) \right] \quad (3.34)$$

3.3. Corte simples com ancoragem mecânica

3.3.1. Enquadramento teórico

As diferenças entre o ensaio de corte simples sem e com ancoragem mecânica estão nas condições de fronteira, pelo que, as condições de fronteira previamente definida em (3.7) e (3.8) são agora substituídas pelas condições de fronteira seguintes:

$$\varepsilon(x=0) = \frac{ds(x=0)}{dx} = \varepsilon_0 \quad (3.35)$$

e

$$s(x=0) = 0 \quad (3.36)$$

As extensões no compósito de FRP são dadas por uma expressão semelhante à da Eq. (3.6). No entanto, as condições de fronteira são agora diferentes e é por isso que a constante C_l na Eq. (3.6) é agora substituída pela constante C_5 . Assim, a distribuição de extensão ao longo do FRP é:

$$\frac{ds}{dx} = \sqrt{\frac{2G_f}{t_p} \cdot \left(\frac{1}{E_p} + \frac{b_p \cdot t_p}{E_s \cdot t_s \cdot b_s} \right) \cdot (1 - e^{-B \cdot s})^2 + C_5} \quad (3.37)$$

onde:

$$C_5 = \varepsilon_0^2 \quad (3.38)$$

A Eq. (3.37) pode ser escrita da seguinte forma:

$$\int \frac{ds}{\sqrt{(1 - e^{-B \cdot s})^2 + \frac{\varepsilon_0^2}{D}}} = \int D dx \quad (3.39)$$

onde D é definido de acordo com a Eq. (3.10). Integrando a Eq. (3.39) resulta:

$$\frac{\operatorname{arcsinh} \left[\frac{\varepsilon_0 \cdot e^{B \cdot s}}{D} + \frac{D \cdot e^{B \cdot s}}{\varepsilon_0} - \frac{D}{\varepsilon_0} \right]}{B \cdot \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_0}{D} \right)^2 + 1}} = D \cdot x + C_6 \quad (3.40)$$

onde C_6 é uma constante.

Resolvendo a Eq. (3.40) em ordem a s , os deslizamentos ao longo da interface entre o FRP e o substrato são determinados de acordo com:

$$s(x) = \frac{1}{B} \cdot \ln \left[\frac{\sinh \left((D \cdot x + C_6) \cdot B \cdot \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_0}{D} \right)^2 + 1} \right) + \frac{D}{\varepsilon_0}}{\frac{\varepsilon_0}{D} + \frac{D}{\varepsilon_0}} \right] \quad (3.41)$$

Introduzindo as condição de fronteira definidas em (3.35) a constante C_6 é determinada de acordo com:

$$C_6 = \frac{\operatorname{arcsinh} \left(\frac{\varepsilon_0}{D} \right)}{B \cdot \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_0}{D} \right)^2 + 1}} \quad (3.42)$$

As extensões no compósito de FRP são determinadas de acordo com a Eq. (3.37). Assumindo novamente que as tensões no substrato podem ser negligenciadas quando comparadas com as tensões no compósito de FRP, as últimas são calculadas agora de acordo com:

$$\frac{ds}{dx} = \varepsilon(x) = \sqrt{D^2 \cdot \left[1 - \frac{\frac{\varepsilon_0}{D} + \frac{D}{\varepsilon_0}}{\sinh \left(\left(D \cdot x + \frac{\operatorname{arcsinh} \left(\frac{\varepsilon_0}{D} \right)}{B \cdot \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_0}{D} \right)^2 + 1}} \cdot B \cdot \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_0}{D} \right)^2 + 1} + \frac{D}{\varepsilon_0} \right)} \right]^2 + \varepsilon_0^2} \quad (3.43)$$

Finalmente, as tensões de aderência ao longo do comprimento colado são determinadas introduzindo-se a Eq. (3.41) na Eq. (2.30) o que leva a:

$$\tau(x) = 2B \cdot G_f \cdot \frac{\frac{\varepsilon_0}{D} + \frac{D}{\varepsilon_0}}{\sinh \left(\left(D \cdot x + \frac{\operatorname{arcsinh} \left(\frac{\varepsilon_0}{D} \right)}{B \cdot \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_0}{D} \right)^2 + 1}} \cdot B \cdot \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_0}{D} \right)^2 + 1} + \frac{D}{\varepsilon_0} \right)} \times \left(1 - \frac{\frac{\varepsilon_0}{D} + \frac{D}{\varepsilon_0}}{\sinh \left(\left(D \cdot x + \frac{\operatorname{arcsinh} \left(\frac{\varepsilon_0}{D} \right)}{B \cdot \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_0}{D} \right)^2 + 1}} \cdot B \cdot \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_0}{D} \right)^2 + 1} + \frac{D}{\varepsilon_0} \right)} \right) \quad (3.44)$$

3.3.2. Curva carga vs. deslizamento

A curva carga vs. deslizamento da ligação do compósito de FRP com o substrato com ancoragem mecânica é bastante diferente da curva carga vs. deslizamento descrita em 3.2.3 porque, nesta nova situação, o deslizamento fica restringido na extremidade livre do compósito FRP. Ainda assim, dependendo do comprimento colado, o processo de descolamento tem algumas

semelhanças com o analisado em 3.2.3. Por conseguinte, uma vez que as tensões de aderência em $x = 0$ são zero (ver Figura 2.18) o processo de descolamento é igual ao caso sem ancoragem mecânica. Verifica-se pois, que o processo de descolamento é altamente dependente do comprimento colado [11, 19, 20, 24, 47]. Para um teste de corte simples e assumindo o comprimento colado curto ($L_{eff} > L_b$), o processo de descolamento inicia-se com uma força na ancoragem ou, simplesmente com uma reação (R) igual a zero. Enquanto as cargas transmitidas ao compósito de FRP forem baixas, a força R continuará a ser nula.

À medida que a carga transmitida para o compósito aumenta, a tensão de aderência na extremidade ancorada do compósito de FRP começa a aumentar e o processo, daqui em diante, difere do processo de descolamento sem ancoragem mecânica. À medida que a carga transmitida para o compósito de FRP continua a aumentar, a tensão de aderência na vizinhança da extremidade carregada diminui e a tensão máxima de aderência migra a partir da extremidade carregada do FRP para a extremidade ancorada.

No entanto, neste processo, a tensão de aderência na extremidade ancorada do FRP é sempre zero devido à restrição do deslizamento. Além disso, uma vez que a força de reação começa a aumentar, o campo de tensão de aderência tende a reduzir e a carga transmitida para o compósito de FRP continua a aumentar. O comportamento do descolamento completo pode ser explicado sob o ponto de vista do equilíbrio das forças ao longo da interface, i.e. através da equação de equilíbrio [19, 34, 36]:

$$F = \int_0^{L_b} \tau(x) \cdot b_p dx + R \quad (3.45)$$

onde R é a força de reação na ancoragem mecânica em $x = 0$ (simulado por um apoio simples). O equilíbrio de forças da Eq. (3.45) é independente do modelo *bond-slip* local e esta equação de equilíbrio pode ser indicada, independentemente da área colada.

A falha por descolamento é também caracterizada por um aumento da carga aplicada ao compósito de FRP, no qual a quantidade do integral definido na Eq. (3.45) começa a diminuir [19, 34, 36]. Ao mesmo tempo, a força na reação (R) aumenta na mesma proporção à diminuição do integral da Eq. (3.45). Note-se, que o processo de descolamento tenderá para a rigidez de tração axial do compósito de FRP (K_p):

$$K_p = \frac{E_p \cdot A_p}{L_b} \quad (3.46)$$

Portanto, ao analisar a Eq. (3.46) verifica-se que para comprimentos colados curtos o declive das curvas carga vs. deslizamento é maior do que para comprimentos colados longos e quanto mais curto for o comprimento maior é o declive, como também se pode verificar na Figura 3.3.

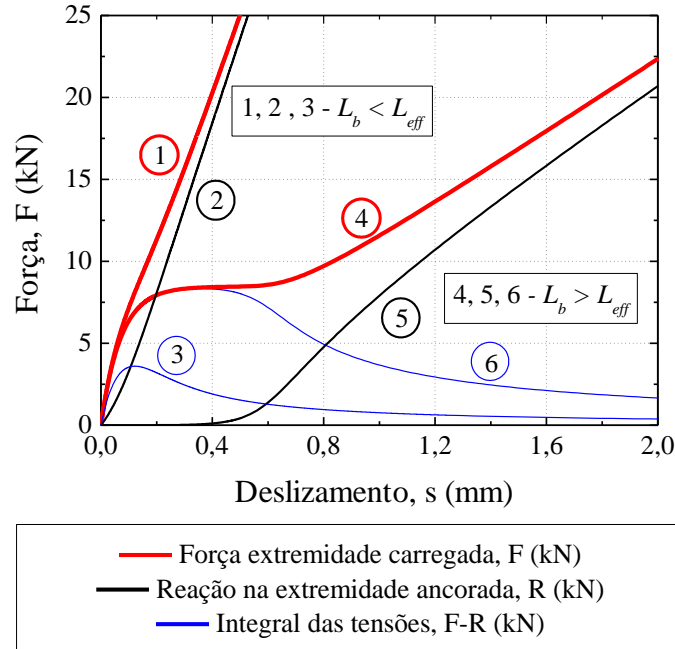


Figura 3.3 – Diferença analítica dos ensaios de corte simples com ancoragem mecânica para diferentes comprimentos colados: $L_b < L_{eff}$ ($L_b=50$ mm) e $L_b > L_{eff}$ ($L_b=200$ mm). Parâmetros: $B = 13,71 \text{ mm}^{-1}$; $A = 0.0038$; $E_f = 159 \text{ GPa}$ e $A_f = 14 \text{ mm}^2$

Para um teste de corte simples com comprimento efetivo da ligação menor ou igual ao comprimento colado ($L_{eff} \leq L_b$), o processo de descolamento com ancoragem mecânica é igual ao obtido sem ancoragem mecânica quando a carga máxima transmitida ao compósito FRP é alcançada.

Além disso, proporcionalmente ao comprimento colado, observa-se um patamar na curva carga vs. deslizamento da ligação FRP/aço devido à transferência das tensões de aderência na vizinhança da extremidade carregada do FRP para o lado oposto.

Uma vez mais, a carga transmitida ao compósito FRP durante o ensaio aumenta ao mesmo tempo que a força de reação, enquanto que o integral definido na Eq. (3.45) diminui. Neste caso, a curva carga vs. deslizamento é dividida em três partes diferentes, como se pode verificar na Figura 3.4: (i) resposta não linear, onde o processo de descolamento é semelhante ao do processo de descolamento sem ancoragem mecânica; (ii) patamar que corresponde à transferência da tensão de aderência entre a extremidade carregada FRP (1) e a extremidade ancorada do FRP (5); (iii) novo aumento de carga com uma inclinação que tende para a rigidez de tração axial do compósito de FRP que pode ser determinado de acordo com a Eq. (3.46).

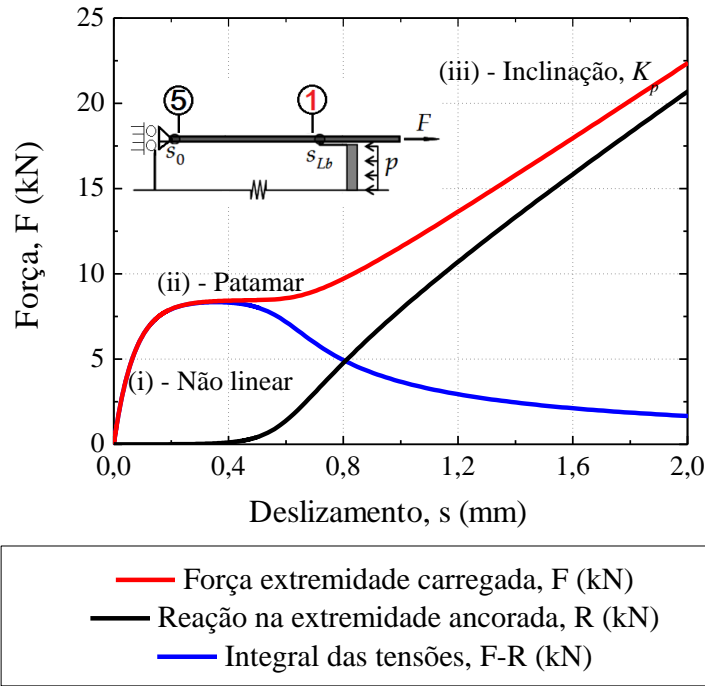


Figura 3.4 – Modelo analítico de um ensaio de corte simples com ancoragem mecânica para $L_b > L_{eff}$, valores dos parâmetros: $B = 13,71 \text{ mm}^{-1}$; $A = 0,38\%$; $E_f = 159 \text{ GPa}$; $A_f = 14 \text{ mm}^2$ e $L_b = 200 \text{ mm}$

No caso particular da curva carga vs. deslizamento, a carga em $x = L_b$, é determinada, independentemente do comprimento colado, a partir da Eq. (3.43) e de acordo com:

$$F(x=L_b) = \varepsilon(x=L_b) \cdot E_p \cdot t_p \cdot b_p =$$

$$= E_p \cdot t_p \cdot b_p \cdot \left[D^2 \cdot \left(1 - \frac{\frac{\varepsilon_0}{D} + \frac{D}{\varepsilon_0}}{\sinh \left(\frac{D \cdot L_b + \frac{\text{arcsinh} \left(\frac{\varepsilon_0}{D} \right)}{B \cdot \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_0}{D} \right)^2 + 1}} \cdot B \cdot \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_0}{D} \right)^2 + 1} + \frac{D}{\varepsilon_0}} \right)} \right)^2 + \varepsilon_0^2 \right] \quad (3.47)$$

Os deslizamentos em $x = L_b$ são determinados a partir da Eq. (3.41):

$$s(x = L_b) = \frac{1}{B} \cdot \ln \left[\frac{\sinh \left(\left(D \cdot L_b + \frac{\operatorname{arcsinh} \left(\frac{\varepsilon_0}{D} \right)}{B \cdot \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_0}{D} \right)^2 + 1}} \right) \cdot B \cdot \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_0}{D} \right)^2 + 1} + \frac{D}{\varepsilon_0} \right)}{\frac{\varepsilon_0}{D} + \frac{D}{\varepsilon_0}} \right] \quad (3.48)$$

3.3.3. Variação do comprimento colado durante o processo de descolamento

Na análise numérica feita por Biscaia *et al.* [19], foi identificada uma variação do comprimento colado durante o processo de descolamento de um FRP num ensaio com ancoragem mecânica. Analisaram a ligação entre um FRP e o betão com base num modelo de *bond-slip* bilinear que pode ser visto como uma aproximação aos modelos *bond-slip* não lineares.

O modelo de *bond-slip* exponencial agora usado no modelo analítico proposto permite o cálculo das variações de comprimento colado durante todo o processo de descolamento do FRP do substrato. Portanto, para um certo deslizamento (s_{ult}) a interface desloca-se e a variação do comprimento colado durante o processo de descolamento é calculado de acordo com a Eq. (3.41) igualando-a a s_{ult} , o que conduz a:

$$L_b^\tau = \frac{1}{D \cdot B \cdot \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_0}{D} \right)^2 + 1}} \cdot \left[\operatorname{arcsinh} \left(\left(\frac{\varepsilon_0}{D} + \frac{D}{\varepsilon_0} \right) \cdot e^{s_{ult} \cdot B} - \frac{D}{\varepsilon_0} \right) - \operatorname{arcsinh} \left(\frac{\varepsilon_0}{D} \right) \right] \quad (3.49)$$

A Figura 3.5 compara a relação F_{db} / F_{max} vs. L_b^τ / L_{eff} ao longo do descolamento da ligação do FRP com o aço assumindo um modelo *bond-slip* bilinear [19] e o modelo *bond-slip* exponencial utilizado no método analítico proposto. A carga máxima transmitida ao compósito de FRP (F_{max}) é calculada a partir da Eq. (3.22) considerando que o comprimento efetivo da ligação (L_{eff}) é determinado a partir da Eq. (3.25).

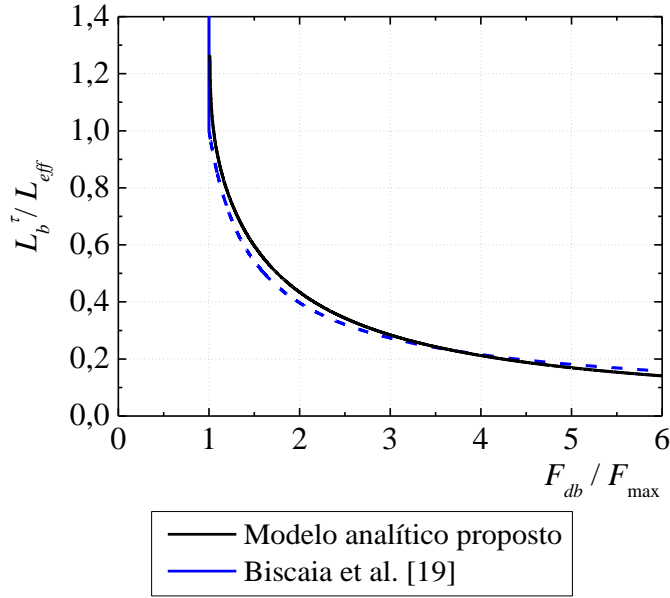


Figura 3.5 - F_{db} / F_{max} vs. L_b^τ / L_{eff} relação ao longo do processo de descolamento da interface do FRP com o aço assumindo um modelo *bond-slip* bilinear [19] e o modelo *bond-slip* exponencial utilizados no método teórico proposto.

Comparando ambas as análises, pode ser visto que são muito semelhantes o que revela que a variação da L_b^τ durante o processo de descolamento total da interface não tem dependência significativa do modelo *bond-slip* assumido em ambas as análises. Portanto, a carga no início do descolamento (F_{db}) é determinado de acordo com a proposta feita em [19]:

$$F_{db} = \begin{cases} \beta_{db} \cdot \beta_L \cdot b_p \cdot \sqrt{2G_f \cdot E_p \cdot t_p} & \text{se } L_b < L_{eff} \\ \beta_{db} \cdot b_p \cdot \sqrt{2G_f \cdot E_p \cdot t_p} & \text{se } L_b \geq L_{eff} \end{cases} \quad (3.50)$$

onde β_{db} é:

$$\beta_{db} = \begin{cases} \frac{1}{3} \cdot \left[\left(\frac{L_{eff}}{L_b^\tau} \right)^{1.5} + 2 \right] & \text{se } L_b < L_{eff} \\ 1 & \text{se } L_b \geq L_{eff} \end{cases} \quad (3.51)$$

3.3.4. Força no substrato

A partir da Eq. (2.10), da expressão das tensões de aderência (2.26) e da expressão dos deslizamentos (3.41), pode ser determinada expressão das tensões ao longo do comprimento no substrato. Isolando as tensões no substrato, $\sigma_s(x)$, da Eq. (2.10) fica:

$$\sigma_s(x) = -\frac{b_f}{t_s \cdot b_s} \int_0^{L_b} \tau(x) dx \quad (3.52)$$

Substituindo a equação das tensões de aderência (2.26) na Eq. (3.26) resulta:

$$\sigma_s(x) = -\frac{b_f}{t_s \cdot b_s} \cdot D^2 \cdot B \cdot E_f \cdot t_f \int_0^{L_b} (e^{-B \cdot s(x)} - e^{-2 \cdot B \cdot s(x)}) dx \quad (3.53)$$

Substituindo a Eq (3.14) na Eq (3.53), obtém-se:

$$\sigma_s(x) = -\frac{E_f t_f b_f}{t_s \cdot b_s} \cdot D^2 \cdot B \times \int_0^{L_b} \frac{\frac{\varepsilon_0}{D} + \frac{D}{\varepsilon_0}}{\sinh \left(\left(D \cdot x + \frac{\operatorname{arcsinh}\left(\frac{\varepsilon_0}{D}\right)}{B \cdot \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_0}{D}\right)^2 + 1}} \right) \cdot B \cdot \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_0}{D}\right)^2 + 1} + \frac{D}{\varepsilon_0} \right)} dx \quad (3.54)$$

Realizando a integração da Eq. (3.54) resulta:

$$\sigma_s(x) = -\frac{E_f t_f b_f}{t_s \cdot b_s} \cdot D^2 \cdot B \times \left[\frac{\varepsilon_0 (D^2 + \varepsilon_0^2) \cdot \cosh \left(B \cdot \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_0}{D}\right)^2 + 1} \cdot \left(\frac{\operatorname{arcsinh}\left(\frac{\varepsilon_0}{D}\right)}{B \cdot \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_0}{D}\right)^2 + 1}} + D \cdot x \right) \right)}{B \cdot D^3 \cdot \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_0}{D}\right)^2 + 1} \cdot \left(\varepsilon_0 \cdot \sinh \left(B \cdot \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_0}{D}\right)^2 + 1} \cdot \left(\frac{\operatorname{arcsinh}\left(\frac{\varepsilon_0}{D}\right)}{B \cdot \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_0}{D}\right)^2 + 1}} + D \cdot x \right) \right) + \frac{D}{\varepsilon_0} \right)} + C_7 \right] \quad (3.55)$$

onde D é a extensão máxima da ligação FRP/aço. Admitindo que tensões no substrato na extremidade carregada, $x = L_b$, são nulas, a constante C_6 fica definida de acordo com:

$$C_7 = - \frac{\varepsilon_0(D^2 + \varepsilon_0^2) \cdot \cosh \left(B \cdot \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_0}{D}\right)^2 + 1} \cdot \left(\frac{\operatorname{arcsinh}\left(\frac{\varepsilon_0}{D}\right)}{B \cdot \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_0}{D}\right)^2 + 1}} + D \cdot L_b \right) \right)}{B \cdot D^3 \cdot \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_0}{D}\right)^2 + 1} \cdot \left(\varepsilon_0 \cdot \sinh \left(B \cdot \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_0}{D}\right)^2 + 1} \cdot \left(\frac{\operatorname{arcsinh}\left(\frac{\varepsilon_0}{D}\right)}{B \cdot \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_0}{D}\right)^2 + 1}} + D \cdot L_b \right) \right) + \frac{D}{\varepsilon_0} \right)} \quad (3.56)$$

As tensões máximas no substrato acontecem na extremidade livre e são obtidas a partir da Eq. (3.55) com $x = 0$ obtendo-se:

$$\sigma_s^{max} (x = 0) = - \frac{E_f t_f b_f}{t_s \cdot b_s} \cdot \left[\frac{\varepsilon_0(D^2 + \varepsilon_0^2) \cdot \cosh \left(\operatorname{arcsinh}\left(\frac{\varepsilon_0}{D}\right) \right)}{2 \cdot D^2 \cdot \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_0}{D}\right)^2 + 1}} - \frac{\varepsilon_0(D^2 + \varepsilon_0^2) \cdot \cosh \left(B \cdot \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_0}{D}\right)^2 + 1} \cdot \left(\frac{\operatorname{arcsinh}\left(\frac{\varepsilon_0}{D}\right)}{B \cdot \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_0}{D}\right)^2 + 1}} + D \cdot L_b \right) \right)}{D \cdot \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_0}{D}\right)^2 + 1} \cdot \left(\varepsilon_0 \cdot \sinh \left(B \cdot \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_0}{D}\right)^2 + 1} \cdot \left(\frac{\operatorname{arcsinh}\left(\frac{\varepsilon_0}{D}\right)}{B \cdot \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_0}{D}\right)^2 + 1}} + D \cdot L_b \right) \right) + D} \right] \quad (3.57)$$

Capítulo 4

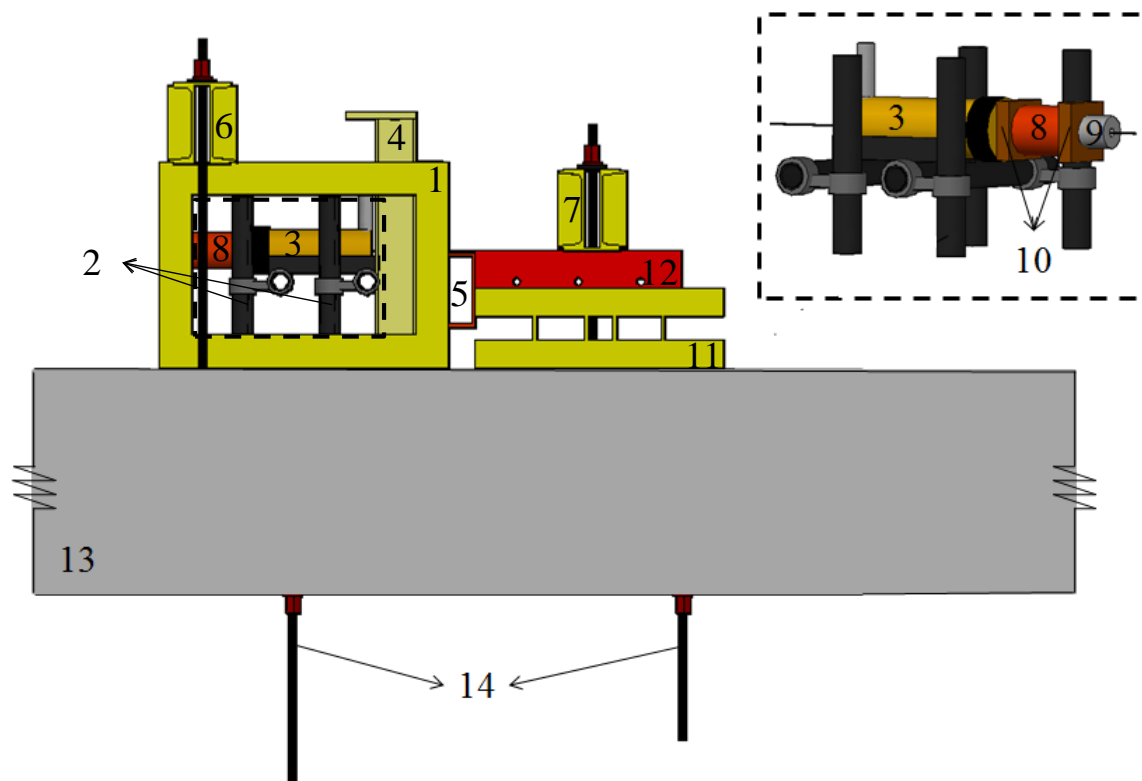
Programa experimental

4.1. Equipamento e características dos materiais

Os ensaios de corte simples neste trabalho foram cuidadosamente realizados por um esquema de ensaio desenvolvido propositadamente para o efeito. O equipamento usado nos ensaios tem em conta as várias condicionantes existentes e relacionadas com o material disponível, os meios humanos, as instalações disponíveis, entre outras, no laboratório do DEC da FCT/UNL. Para a realização dos ensaios de corte, recorreu-se aos seguintes materiais/equipamentos:

- Gaiola de aço;
- Macaco hidráulico;
- Perfil de aço colocada verticalmente – de efeito ação-reação com o macaco hidráulico;
- Perfil de aço soldado à gaiola – de efeito ação-reação com a viga metálica;
- Viga metálica para fixação da gaiola à laje do laboratório, impedindo quaisquer deslocamentos verticais da gaiola;
- Viga metálica para fixação do provete;
- Célula de carga e chapas metálicas;
- Cunhas metálicas;
- Perfil metálico para suporte do provete;

Na Figura 4.1 apresenta-se o esquema do ensaio de corte simples utilizado para os ensaios experimentais realizados nesta dissertação. Na Figura 4.2 encontra-se o equipamento usado nos ensaios experimentais em vista 3D.



1	Gaiola de aço	8	Transdutor de pressão
2	Tubos para suporte do macaco	9	Cunhas metálicas
3	Macaco hidráulico	10	Chapas metálicas
4	Perfil de aço colocado verticalmente	11	Perfil metálico para suporte do provete
5	Perfil de aço soldado à gaiola	12	Provete metálico
6	Viga metálica para fixação da gaiola à laje do laboratório	13	Laje de betão
7	Viga metálica para fixação do provete	14	Varões roscados Dywidag

Figura 4.1 – Alçado do ensaio de corte simples experimental em Autocad 2012

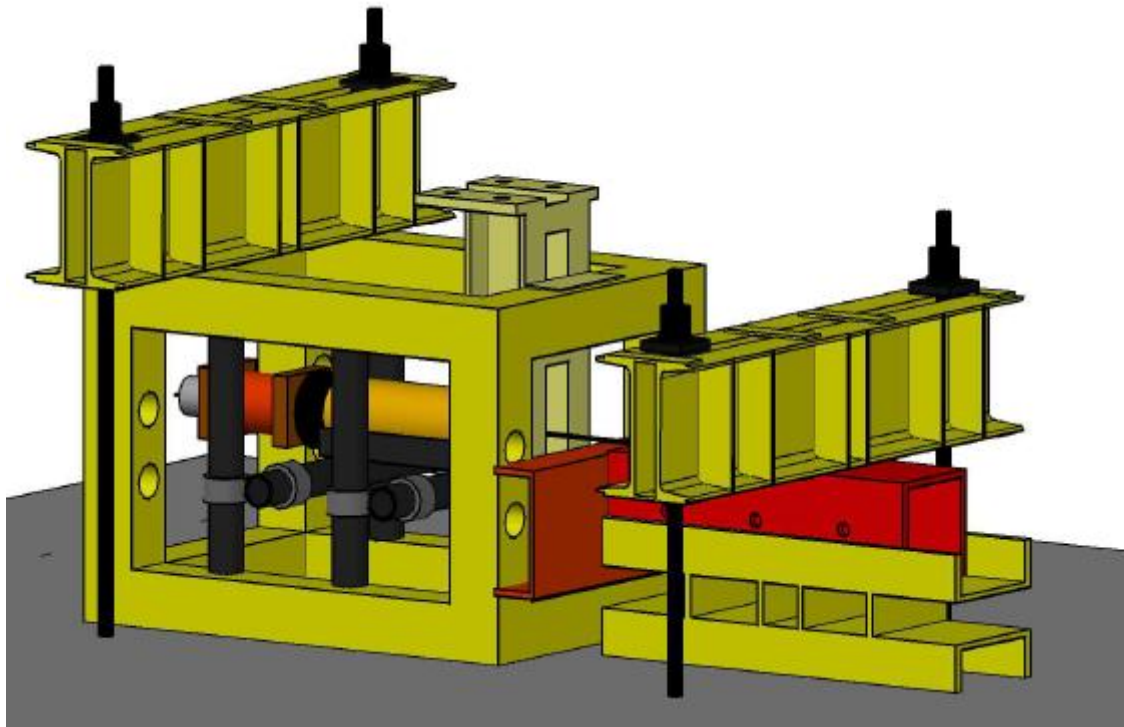


Figura 4.2 – Esboço geral do equipamento usado nos ensaios experimentais de corte simples, autocad 2012

4.2. Viga metálica de ensaio

Cada ensaio de corte simples é constituído por um perfil metálico colado com um laminado de CFRP. O perfil metálico usado é um perfil oco de secção retangular com dimensões 100 mm x 100 mm com 10 mm de espessura e 500 mm de comprimento. Não se tendo realizado qualquer ensaio para a caracterização destes perfis metálicos assumiram-se, na sua caracterização mecânica, valores típicos de aços correntes:

- Módulo de elasticidade, $E_s = 210000 \text{ N/mm}^2$;
- Módulo de distorção, $G_s = 81000 \text{ N/mm}^2$;
- Coeficiente de Poisson, $\nu_s = 0,3$;
- Massa volúmica, $\rho_s = 7850 \text{ kg/m}^3$;
- Coeficiente de dilatação térmica linear, $\alpha_s = 12 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$.

4.3. Compósito de CFRP

Nesta dissertação, o CFRP utilizado nos ensaios tem uma largura (b_p) de 10 mm e uma espessura (t_p) de 1,4 mm. Os ensaios de caracterização deste CFRP foram realizados por Carvalho [60], numa máquina de tração universal Zwick com 50kN de capacidade de carga tendo-se obtido um

módulo de elasticidade de 159 GPa, Resultou uma tensão de rotura de 1565 MPa, valor inferior ao apresentado pelo fabricante [60] e por conseguinte a extensão do CFRP é de 0,7%.

4.4. Adesivo

A resina S&P 220 foi o adesivo epoxídico utilizado na ligação em todos os ensaios, adoptando-se sempre 1,4 mm de espessura. A resina S&P 220 utilizada resulta da mistura de dois componentes, A e B, em que o componente A corresponde à resina e o componente B corresponde ao endurecedor com as proporções 2:1 de massa. Carvalho [60] na análise da mistura concluiu que o módulo de elasticidade é de 790 MPa e a extensão de aproximadamente 3,65%.

4.5. Preparação dos materiais a ensaiar

O tipo de preparação da superfície do aço adoptado foi o jacto de areia (ver Figura 4.3). Os provetes metálicos depois de decapados com jacto de areia, foram limpas com acetona para remover quaisquer resíduos e/ou gorduras.



Figura 4.3 – Tratamento da superfície metálica com jato de areia

Procedeu-se à preparação do agente adesivo utilizado, resina epoxídica S&P S220 conforme se mostra na Figura 4.4. Neste processo os dois componentes que compõem o agente adesivo foram misturados nas proporções especificadas pelo fabricante (2:1) em termos de massa.



Figura 4.4 – Preparação do adesivo (S&P S220)

Posteriormente, aplicou-se o laminado de CFRP ao provete metálico. Após a preparação da superfície colocaram-se a resina epoxídica S&P 220 na superfície de aço e o laminado de FRP como mostra a Figura 4.5. O controlo da espessura da resina foi realizado colocando dois comprimentos de laminado de CFRP ao lado da resina mais o CFRP. Em seguida colocaram-se alguns pesos em cima do CFRP. Após um mínimo de sete dias a ligação CFRP/aço foi ensaiado.

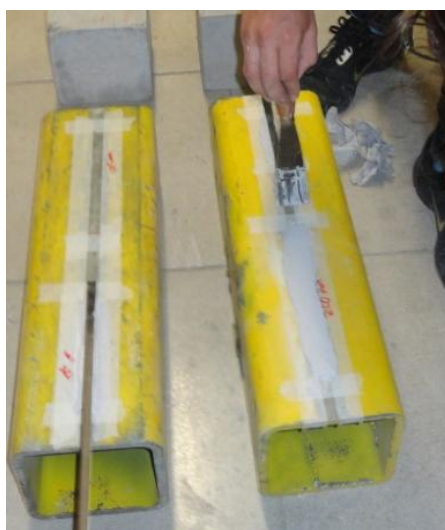


Figura 4.5 – Colocação da resina epoxídica S&P 220 e do compósito de CFRP

4.6. Programa experimental e instrumentação

Os ensaios de corte simples foram levados a cabo no LEDEC da FCT/UNL. Compreendendo a natureza do ensaio, optou-se pela adoção de um sistema horizontal onde a carga é directamente transmitida ao laminado de CFRP através de um macaco hidráulico (contido na gaiola de aço) ficando uma célula de carga posicionada à frente do macaco hidráulico. O êmbolo do macaco

hidráulico ao sair faz reação com uma peça metálica com cunhas e que faz aumentar a força transmitida ao CFRP (veja-se a Figura 4.6).



Figura 4.6 – Macaco hidráulico, transdutor de pressão e cunhas posicionadas na gaiola de aço

Refere-se que esta posição de carregamento é a mais comum em ensaios de corte simples em perfis de aço reforçados com compósitos de FRP [61], garantindo-se assim, maior facilidade na comparação entre diferentes estudos durante os ensaios.

A instrumentação utilizada foi a mesma para todos os ensaios realizados e teve como objetivo a obtenção das forças aplicadas, deslizamentos e extensões da ligação entre o CFRP e a viga metálica durante os ensaios.

Aquando da montagem e preparação do ensaio, todos os modelos foram instrumentados com pelo menos três extensômetros elétricos de resistência (TML-FLA-5-11) em posições bem definidas e determinadas conforme o comprimento colado do provete. Dois extensômetros foram sempre colados nas extremidades do comprimento colado de CFRP e um ou mais extensômetros no meio, espaçados no máximo de 50mm, de modo a obter informação relativa às extensões ao longo do seu comprimento colado. A Figura 4.7 apresenta um exemplo da instrumentação utilizada num ensaio de corte. A Tabela 4.1 apresenta a instrumentação utilizada em cada ensaio de corte simples sem ancoragem mecânica.



Figura 4.7 – Posição dos extensômetros e dos transdutores de deslocamento relativamente ao ensaio S/Anc_Lb150_01

Para além de extensómetros, dois transdutores de deslocamento (LVDT) foram colocados nas extremidades do comprimento colado do CFRP. Por forma a obter-se os deslocamentos nas extremidades coladas do CFRP. O transdutor de deslocamento na extremidade livre é um transdutor (TML-CDP100) com um curso total de 100 mm e uma sensibilidade de $100 \times 10^{-6}/\text{mm}$, e o outro transdutor (TML-DP-25E) com um curso total de 25 mm destinado a registar os deslocamentos na extremidade carregada com uma sensibilidade de $25 \times 10^{-6}/\text{mm}$.

O ensaio termina quando ocorre a rotura da ligação do laminado de CFRP com o aço. A carga transmitida ao compósito de CFRP foi controlada a partir de uma bomba hidráulica com servo-controlo que, ao introduzi-lo no sistema, faz sair o êmbolo do macaco hidráulico que empurra a célula de carga juntamente com as cunhas levando ao descolamento da ligação do CFRP/aço.

O perfil que prende o provete metálico nos ensaios sem amarração mostrada na Figura 4.8, nunca prende o laminado de CFRP, servindo apenas para que o provete metálico fique fixo. Porém, nos ensaios com amarração mecânica a amarração do compósito de CFRP foi feito com esse perfil metálico. Neste caso, duas células de carga foram colocadas nos varões que fixam o provete (veja-se Figura 4.9). Na Tabela 4.2 estão mencionados os materiais e número de ensaios de corte simples realizados com ancoragem mecânica. É ainda de referir que foi usado apenas um transdutor de deslocamentos (TML-DP-25E) com um curso total de 25 mm destinado a registar os deslocamentos na extremidade carregada com uma sensibilidade de $25 \times 10^{-6}/\text{mm}$. Na extremidade ancorada não foi usado transdutor de deslocamento por falta de espaço, visto a viga metálica de fixação ocupar esse espaço.

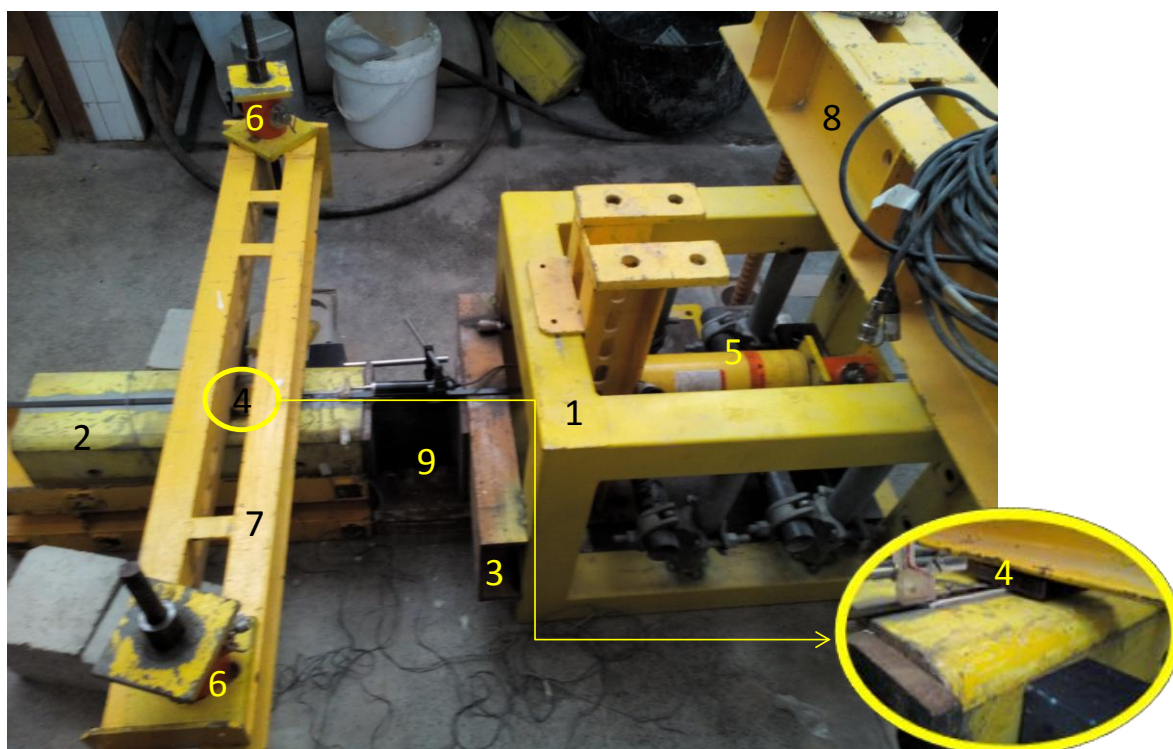
Tabela 4.1 – Instrumentação usada nos ensaios de corte simples sem ancoragem mecânica

Nº	Nomenclatura	Comprimento Colado (mm)	Nº do ensaio	Nº de extensômetros	Nº de defletômetros	Fotografia
5	S/Anc_Lb200_01	200	1	-	2 (extremidades CFRP)	Sim
12	S/Anc_Lb200_02	200	2	5	2 (extremidades CFRP)	Não
6	S/Anc_Lb175_01	175	1	5	2 (extremidades CFRP)	Não
14	S/Anc_Lb175_02	175	2	4	2 (extremidades CFRP)	Não
1	S/Anc_Lb150_01	150	1	4	2 (extremidades CFRP)	Não
17	S/Anc_Lb150_02	150	2	4	2 (extremidades CFRP)	Não
9	S/Anc_Lb100_01	100	1	3	2 (extremidades CFRP)	Não
15	S/Anc_Lb100_02	100	2	3	2 (extremidades CFRP)	Não
4	S/Anc_Lb100_03	100	3	-	2 (extremidades CFRP)	Sim
10	S/Anc_Lb75_01	75	1	3	2 (extremidades CFRP)	Não
16	S/Anc_Lb75_02	75	2	3	2 (extremidades CFRP)	Não
2	S/Anc_Lb75_03	73	3	-	2 (extremidades CFRP)	Sim
8	S/Anc_Lb50_01	50	1	3	2 (extremidades CFRP)	Não
13	S/Anc_Lb50_02	50	2	3	2 (extremidades CFRP)	Não
18	S/Anc_Lb25_01	25	1	-	2 (extremidades CFRP)	Sim
19	S/Anc_Lb25_02	25	2	-	2 (extremidades CFRP)	Sim
20	S/Anc_Lb10_01	10	1	-	2 (extremidades CFRP)	Sim
21	S/Anc_Lb10_02	10	2	-	2 (extremidades CFRP)	Sim



1	Gaiola de aço	5	Macaco hidráulico
2	Provete metálico	6	Máquina Fotográfica
3	Perfil de aço soldado à gaiola	7	Viga metálica para fixação do provete
4	Perfil metálico para suporte do provete	8	Viga metálica para fixação da gaiola à laje do laboratório

Figura 4.8 – Organização do equipamento e material para a realização do ensaio corte simples sem amarração mecânica.



1	Gaiola de aço	6	Transdutores de pressão
2	Provete metálico	7	Viga metálica para fixação do provete
3	Perfil de aço soldado à gaiola	8	Viga metálica para fixação da gaiola à laje do laboratório
4	Chapa de ancoragem do CFRP	9	Acrescento da viga
5	Macaco hidráulico		

Figura 4.9 – Organização do equipamento e material para a realização do ensaio corte simples com amarração mecânica.

Tabela 4.2 - Instrumentação usada nos ensaios de corte simples com ancoragem mecânica

Nº	Nomenclatura	Comprimento Colado (mm)	Nº do ensaio	Nº de extensômetros	Nº de defletômetros	Fotografia
1	S/Anc_Lb200_01	200	1	5	1 (extremidade carregada CFRP)	Sim
2	S/Anc_Lb200_02	200	2	5	1 (extremidade carregada CFRP)	Sim
3	S/Anc_Lb50_01	50	1	3	1 (extremidade carregada CFRP)	Sim
4	S/Anc_Lb50_02	50	2	3	1 (extremidade carregada CFRP)	Sim

Capítulo 5

Resultados e discussão dos dados ensaiados

O presente capítulo resume-se à análise dos resultados obtidos a partir dos ensaios experimentais, tanto para os ensaios de corte simples sem ancoragem mecânica como para os ensaios de corte simples com ancoragem mecânica. Em ambos os ensaios de corte simples faz-se interpretações gráficas para os diferentes comprimentos colados com os devidos comentários.

5.1. Ensaio de corte simples sem ancoragem mecânica

Os valores de força transmitida ao compósito de FRP, extensão e deslizamento foram obtidos da monitorização realizada em cada ensaio a partir da célula de carga, dos extensómetros e de transdutores de deslocamento, respectivamente.

Os valores de deslizamento em pontos específicos do compósito de CFRP foram obtidos através das leituras realizadas pelos extensómetros, i.e., a partir da expressão:

$$s = \int_0^L \varepsilon dx \quad (5.1)$$

Determinou-se o integral da Eq. (5.1) recorrendo à regra dos trapézios. A partir da expressão (2.24) da página 26, as tensões de aderência foram determinadas em diferentes pontos do compósito de CFRP.

Inicialmente estimou-se o comprimento efectivo da ligação CFRP/aço a partir da Eq. (3.24) da página 39 proposta por Xia e Teng [27] e na qual se assume um $s_{ult} = 0,5$ mm, $E_f = 159$ GPa, $t_f = 1,4$ mm e $G_f = 1$ N/mm resultando um comprimento de 110mm. Consideram-se os provetes com comprimento colados superior ao efectivo aqueles que têm comprimento colado

superior a 110 mm e comprimento colado inferior ao efetivo os demais provetes. A Tabela 5.1 apresenta os valores experimentais obtidos dos ensaios separados pelo comprimento colado.

Tabela 5.1 - Parâmetros experimentais dos ensaios de corte simples sem ancoragem mecânica, para um comprimento de ligação efetivo de 110 mm.

Nomeclatura	$F_{\text{máx}}$ (kN)	$s_{\text{máx}}$ *(mm)	s_{ult} *(mm)	$\tau_{\text{máx}}$ **(MPa)	$\varepsilon_{\text{máx}}$ (-)
Comprimento colado superior ao comprimento efetivo, $L_b > L_{\text{eff}}$					
S/Anc_Lb200_01	8,0	-	-	-	-
S/Anc_Lb200_02	7,2	0,086	0,62	15,5	0,00333
S/Anc_Lb175_01	8,2	0,075	0,35	13,7	0,00381
S/Anc_Lb175_02	6,5	0,113	0,42	8,0	0,00335
S/Anc_Lb150_01	8,9	0,092	0,46	13,0	0,00416
S/Anc_Lb150_02	8,6	0,111	0,52	12,6	0,00380
Comprimento colado inferior ao comprimento efetivo, $L_b < L_{\text{eff}}$					
S/Anc_Lb100_01	7,9	0,073	0,29	5,3	0,00365
S/Anc_Lb100_02	8,2	0,113	0,31	17,2	0,00400
S/Anc_Lb100_03	6,3	-	-	-	-
S/Anc_Lb75_01	8,1	0,085	0,13	15,5	0,00359
S/Anc_Lb75_02	7,4	0,055	0,19	12,4	0,00332
S/Anc_Lb75_03	8,7	-	-	-	-
S/Anc_Lb50_01	8,4	0,055	0,12	20,1	0,00370
S/Anc_Lb50_02	7,6	0,051	0,14	25,4	0,00349
S/Anc_Lb50_03	7,5	0,062	0,24	10,2	0,00370
S/Anc_Lb25_01	2,7	-	-	-	-
S/Anc_Lb25_02	2,6	-	-	-	-
S/Anc_Lb10_01	1,6	-	-	-	-
S/Anc_Lb10_02	2,7	-	-	-	-

*O $s_{\text{máx}}$ corresponde ao deslizamento onde ocorre a tensão máxima e o s_{ult} corresponde ao último deslizamento medido no ensaio experimental.

** $\tau_{\text{máx}}$ corresponde ao valor máximo de tensão medida na extremidade carregada do compósito, portanto é o valor do primeiro extensômetro.

5.1.1. Comprimento colado superior ao comprimento efetivo

As curvas de extensão vs. deslizamento, força vs deslizamento e tensão vs. deslizamento foram obtidas para os três comprimentos colados superiores ao comprimento efetivo, i.e., comprimento colado de 200 mm (S/Anc_Lb200_02), comprimento colado de 175 mm (S/Anc_Lb175_01 e S/Anc_Lb175_02) e comprimento colado de 150 mm (S/Anc_Lb150_01 e S/Anc_Lb150_02).

O ensaio de corte simples sem ancoragem mecânica e com comprimento colado de 200 mm têm cinco extensômetros colados ao longo do CFRP e três transdutores de deslocamento nas extremidades coladas do CFRP. Um dos quais ficou na extremidade carregada (com curso de 25 mm) e os outros na extremidade não carregada (com curso de 100 mm cada um). A Figura 5.1 mostra a imagem do ensaio e as curvas experimentais mencionadas anteriormente.

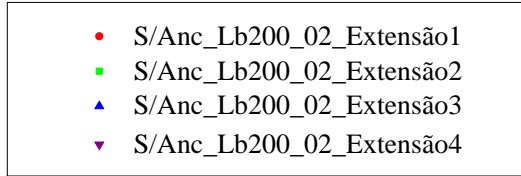
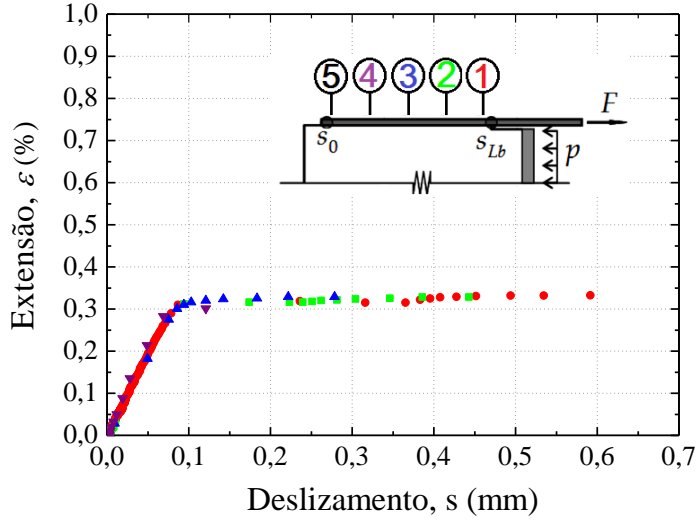
Na Figura 5.1 b), nota-se que para deslizamentos até 0,1 mm as curvas extensão vs. deslizamento aumentaram quase linearmente com o aumento da extensão tendendo a seguir para um valor máximo e constante de extensão do CFRP de 0,33 % aos 0.61 mm de deslizamento. As várias curvas da Figura 5.1 b) correspondem à extensão medida pelos extensômetros colados no compósito de CFRP ao longo do comprimento colado. A curva extensão vs. deslizamento em cada ponto monitorizado têm o mesmo andamento, contudo para pontos mais afastados da extremidade carregada, os deslocamento são mais pequenos consequentemente as extensões máximas atingidas nesses pontos são também menores do que as observadas, para a extremidade carregada do CFRP.

A curva força vs. deslizamento da Figura 5.1 c) mostra o mesmo que a curva extensão vs. deslizamento correspondente aos extensômetros, i.e. inicialmente, os deslizamentos aumentam quase linearmente com a carga até ao deslizamento de 0,1 mm e a partir desse deslizamento os valores de carga tendem para um valor constante de aproximadamente 7.2 kN.

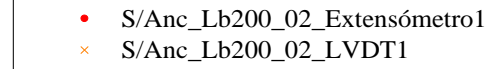
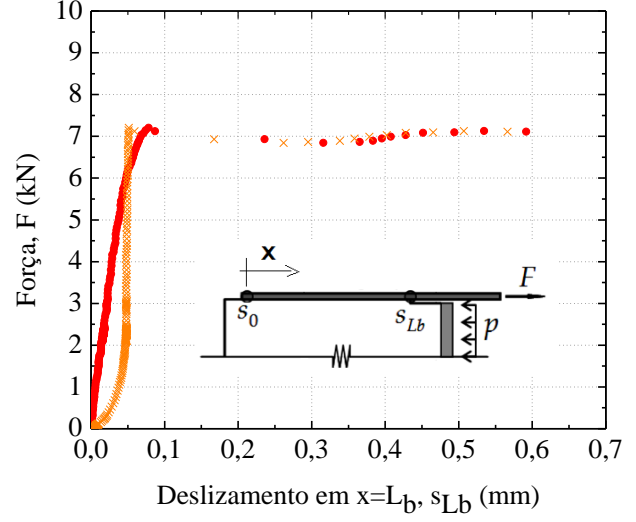
Relativamente às curvas de tensão de aderência vs. deslizamento apresentados na Figura 5.1 d), estas têm um troço inicial quase linear até alcançarem um valor de pico e depois descem, também, quase linearmente para um valor próximo de zero. O pico ou o ponto máximo nestas curvas corresponde à tensão de aderência máxima e cujo deslizamento toma vulgarmente, a designação de deslizamento máximo, $s_{\text{máx}}$. A tensão de aderência máxima experimental obtida com comprimento colado de 200 mm, é 15,5 MPa e cujo deslizamento máximo ($s_{\text{máx}}$) é 0,086 mm. A integração da curva da Figura 5.1 d conduz ao valor da energia de fratura, G_f , é 1,23 N/mm.



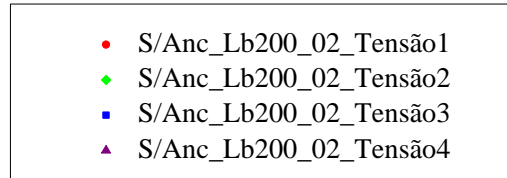
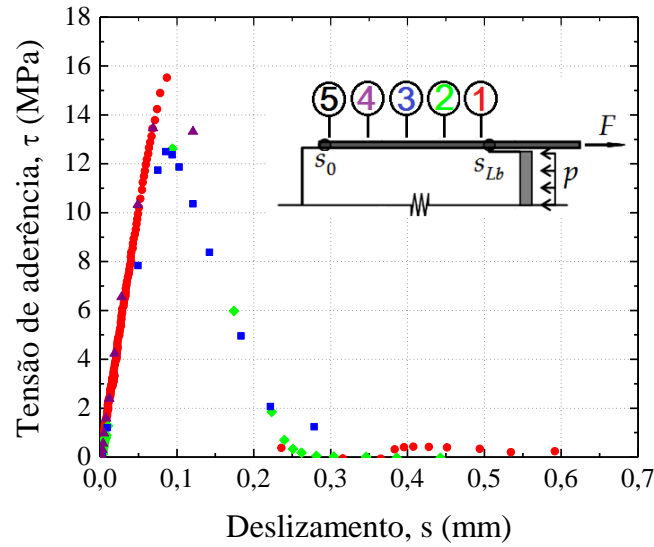
(a)



(b)



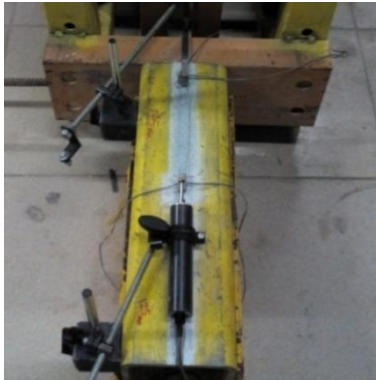
(c)



(d)

Figura 5.1 – (a) Ensaio de corte simples com $L_b = 200$ mm (5 extensômetros e 3 transdutores de deslocamento); Curvas experimentais com comprimento colado 200 mm (b) curva extensão vs. deslocamento (c) curva força vs. deslocamento; (d) curva tensão de aderência vs. deslocamento

O ensaio de corte simples sem ancoragem mecânica com comprimento colado de 175mm foi realizado duas vezes. Em ambos, usaram-se quatro extensômetros ao longo do compósito de CFRP e dois transdutores de deslocamento que ficaram colocados nas extremidades do CFRP colado, conforme se mostra pela Figura 5.2.



(a) Ensaio S/Anc_Lb175_01

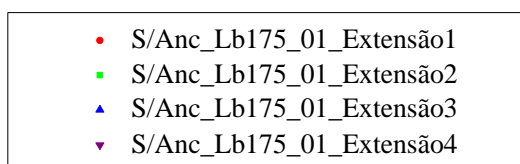
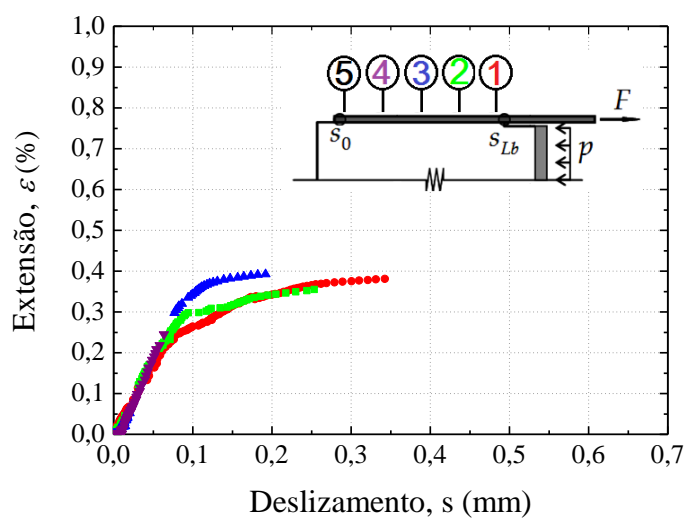


(b) Ensaio S/Anc_Lb175_02

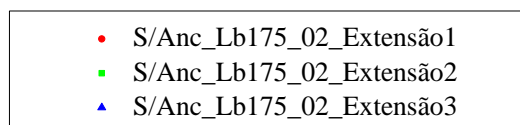
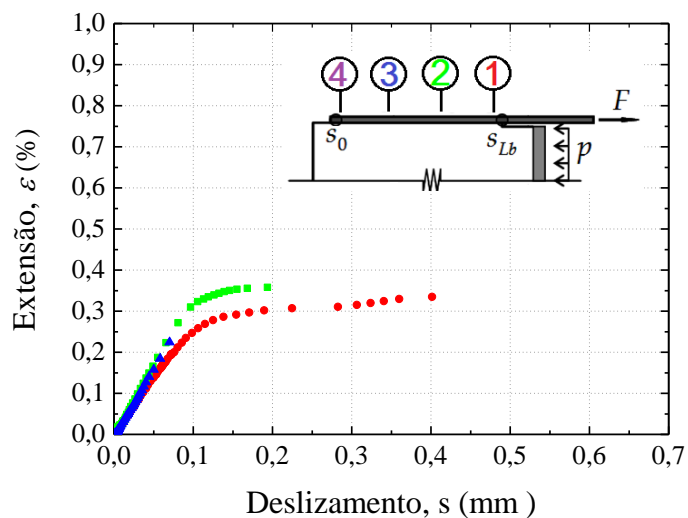
Figura 5.2 - Ensaio de corte simples com L_b de 175mm: (a) Lb175_01 - 4 extensômetros e 2 transdutores de deslocamento, (b) Lb175_02 - 4 extensômetros e 2 transdutores de deslocamento

As curvas extensão vs. deslizamento da Figura 5.3 a) e b) tem comportamentos semelhantes, ambas aumentam quase linearmente com o aumento da extensão para deslizamento até aos 0,1 mm tendendo a seguir para um valor máximo e constante de extensão do CFRP de 0,38 % para o ensaio S/Anc_Lb175_01 e 0,34 % para o ensaio S/Anc_Lb175_02.

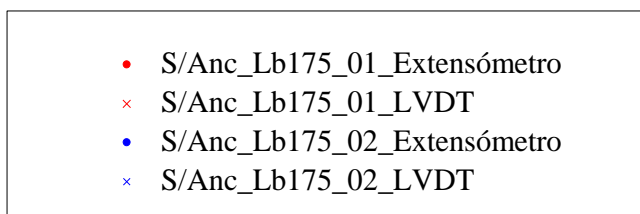
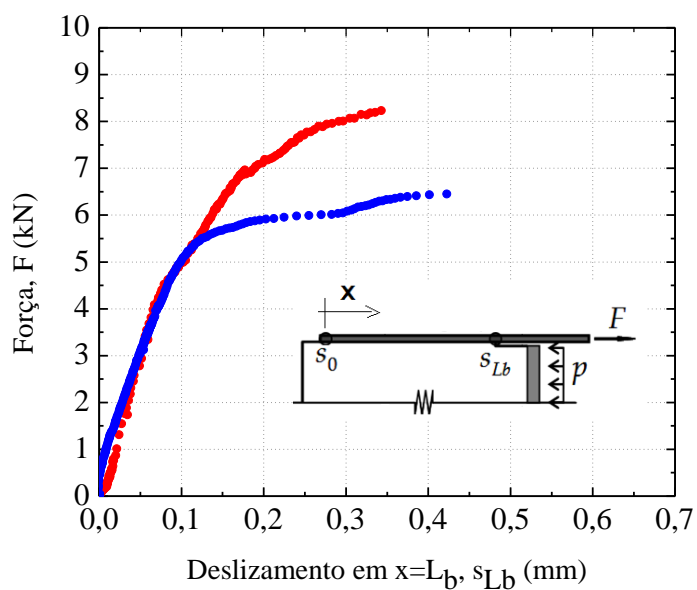
A curva força vs. deslizamento da Figura 5.3 c) mostra que os deslizamentos aumentam quase linearmente com a carga até ao deslizamento 0,08 mm e de seguida os valores de carga tendem para um valor constante, à semelhança das curvas extensão vs. deslizamento da Figura 5.3 a) e b). O ensaio S/Anc_Lb175_01 atinge valores de força maiores que o ensaio S/Anc_Lb175_02. Apesar de, para deslizamentos mais baixos na extremidade carregada, ambos os ensaios apresentaram um comportamento similar, nota-se uma discrepância de valores de força após 0,12 mm de deslizamento. Assim o ensaio S/Anc_Lb175_01 atinge um valor de força máxima de 8,25 kN aos 0,35 mm e o ensaio S/Anc_Lb175_02 atinge a força máxima antes da rotura da ligação aos 6,45 kN para 0,42 mm veja-se da Figura 5.3 c) as curvas S/Anc_Lb175_01_Extensómetro e S/Anc_Lb175_02_Extensómetro, respetivamente.



(a)



(b)



(c)

Figura 5.3 – Ensaio de corte simples sem ancoragem mecânica (a) Curvas de extensão vs. deslizamento S/Anc_Lb175_01; (b) Curvas de extensão vs. deslizamento S/Anc_Lb175_02; (c) Curvas de força vs. deslizamento $L_b = 175$ mm

As curvas força vs. deslizamento correspondentes aos transdutores de deslocamento dão valores de deslizamentos superiores aos extensômetros. No ensaio S/Anc_Lb175_01_LVDT, inicialmente verifica-se uma adaptação dos materiais à força de tracção, onde se mede valores de deslizamentos muito altos e a força é quase nula. Daqui em diante a força começa a subir até atingir o valor de força máxima. Neste caso o deslizamento associado à rotura é de 0,42 mm enquanto que, pela análise a partir dos extensômetros a rotura ocorreu aos 0,35 mm.

No ensaio S/Anc_Lb175_02_LVDT o transdutor de deslocamento posicionado na extremidade carregada registou valores de deslizamento muito superiores às outras curvas da Figura 5.3 c). A acomodação de material foi bastante superior à do ensaio S/Anc_Lb175_01_LVDT, o que evidencia que houve pequenos deslizamentos do provete. Daqui em diante não se faz mais referência gráfica às curvas força vs. deslizamento correspondentes aos transdutores de deslocamento, já que curvas força vs. deslizamento correspondentes às curvas obtidas pela análise a partir dos extensômetros são muito menos dispares.

As curvas de tensão de aderência vs. deslizamento (*bond-slip*) apresentadas na Figura 5.4, têm tensão de aderência máxima para o ensaio S/Anc_Lb175_01 de 13,7 MPa e cujo deslizamento máximo ($s_{\text{máx}}$) é de 0,08 mm e para o ensaio S/Anc_Lb175_02 de 8,0 MPa cujo $s_{\text{máx}}$ é 0,11 mm, medida na extremidade carregada do compósito de CFRP. O valor de discrepância entre as tensões de aderência máxima dos dois ensaios na extremidade carregada é de 41,6 %, valor muito alto para ensaios muito semelhantes.

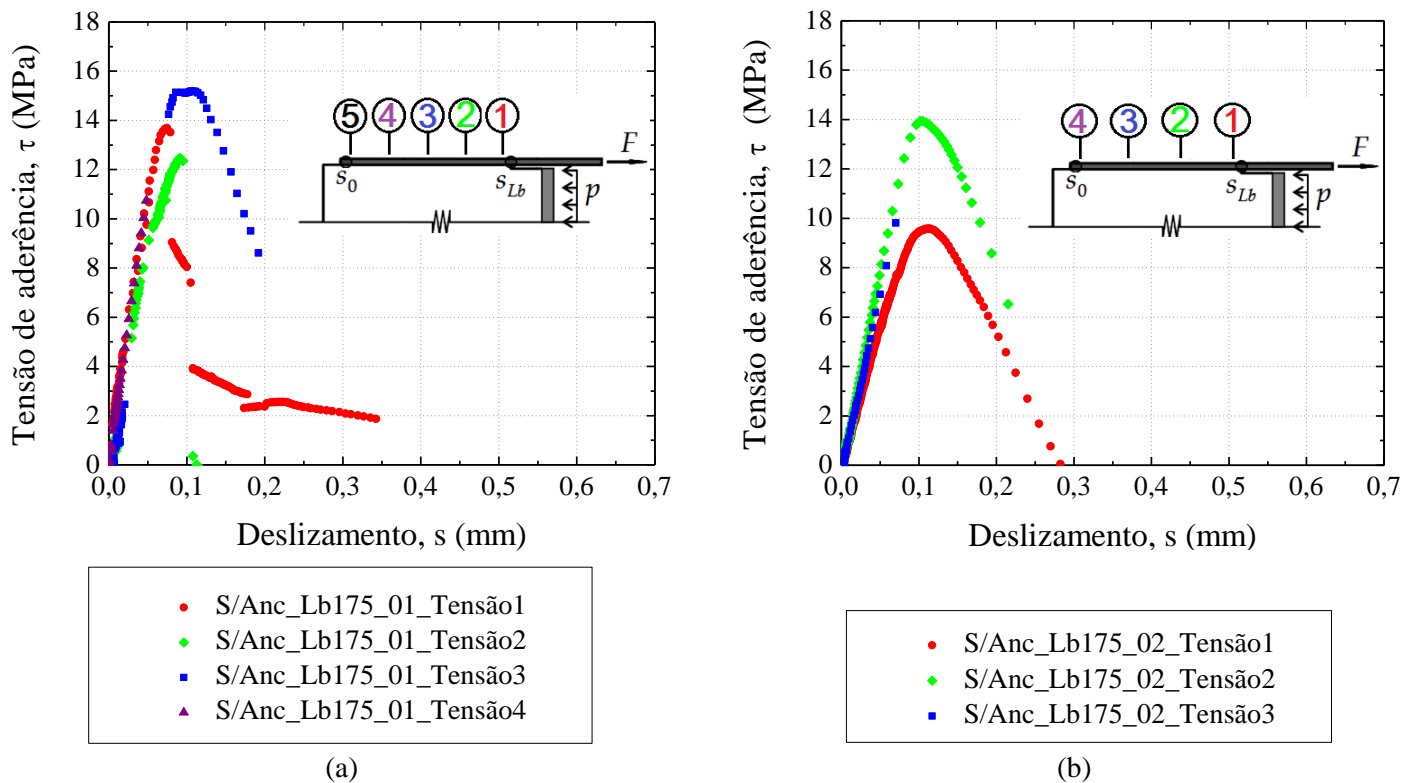


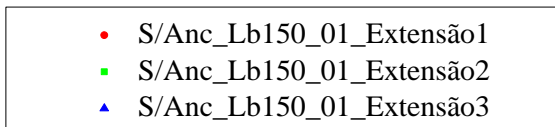
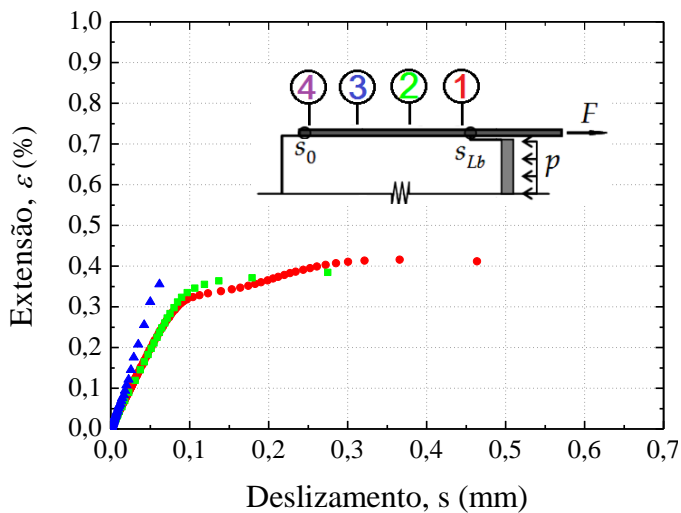
Figura 5.4 - Curvas de tensão de aderência vs. deslizamento (a) S/Anc_Lb175_01 (b) S/Anc_Lb175_02

Para os ensaios de corte simples sem ancoragem mecânica com comprimento colado de 150 mm foram realizados, também, dois ensaios. No primeiro ensaio S/Anc_Lb150_01 usaram-se quatro extensômetros colados ao longo do CFRP e dois transdutores de deslocamentos colocados nas extremidades do CFRP colado conforme se mostra pela Figura 5.5 a). No ensaio S/Anc_Lb150_02 usaram-se três extensômetros e também dois transdutores de deslocamento colados nas extremidades do CFRP colado.

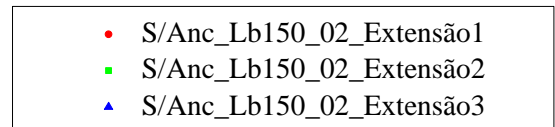
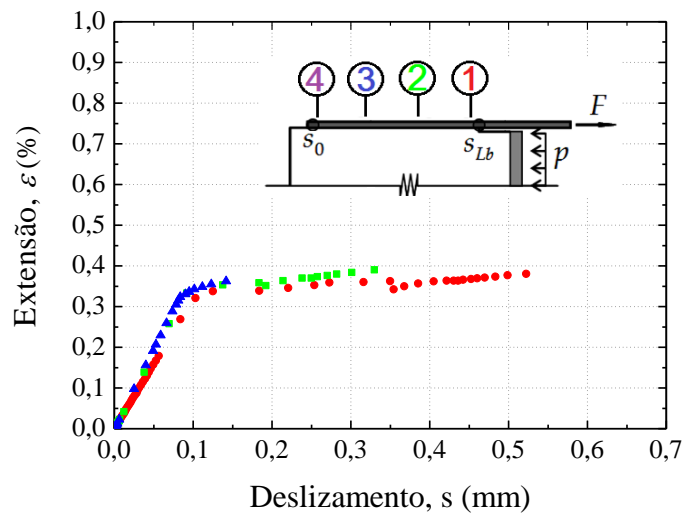
A Figura 5.5 b) e c) mostram as curvas de extensão vs. deslizamento obtidas. Inicialmente, para deslizamentos até 0,1 mm, a extensão no CFRP aumenta de forma quase linear com o aumento do deslizamento na extremidade carregada do CFRP. Para deslizamentos superiores a 0,1 mm, a extensão no CFRP tende para um valor constante. No ensaio S/Anc_Lb150_01 a extensão máxima no CFRP foi de 0,42 % e no ensaio S/Anc_Lb150_02 atingiu-se os 0,38 %.



(a)



(b)



(c)

Figura 5.5 – (a) Ensaio de corte simples para comprimento colado de 150 mm, S/Anc_Lb150_01, 4 extensômetros e 2 LVDT; Curvas de extensão vs. deslizamento: (b) S/Anc_Lb150_01 (c) S/Anc_Lb150_02

As várias curvas mostradas na Figura 5.5 b) e c) representam as extensões no CFRP obtidas em vários pontos sendo que, no extensômetro 1, a curva respectiva é a que esta designada por encarnado S/Anc_Lb150_01_Extensão1. As curvas força vs. deslizamento apresentam o mesmo comportamento que as curvas extensão vs. deslizamento conforme se pode observa na Figura 5.6.

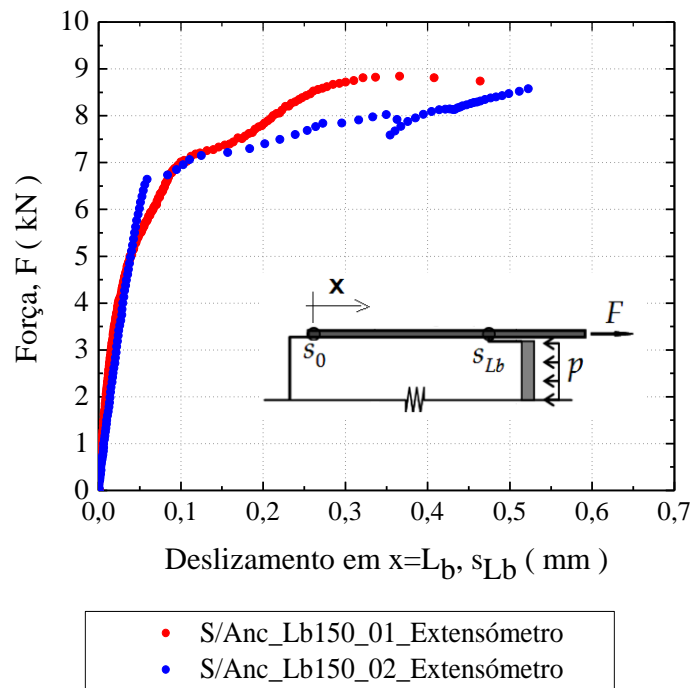
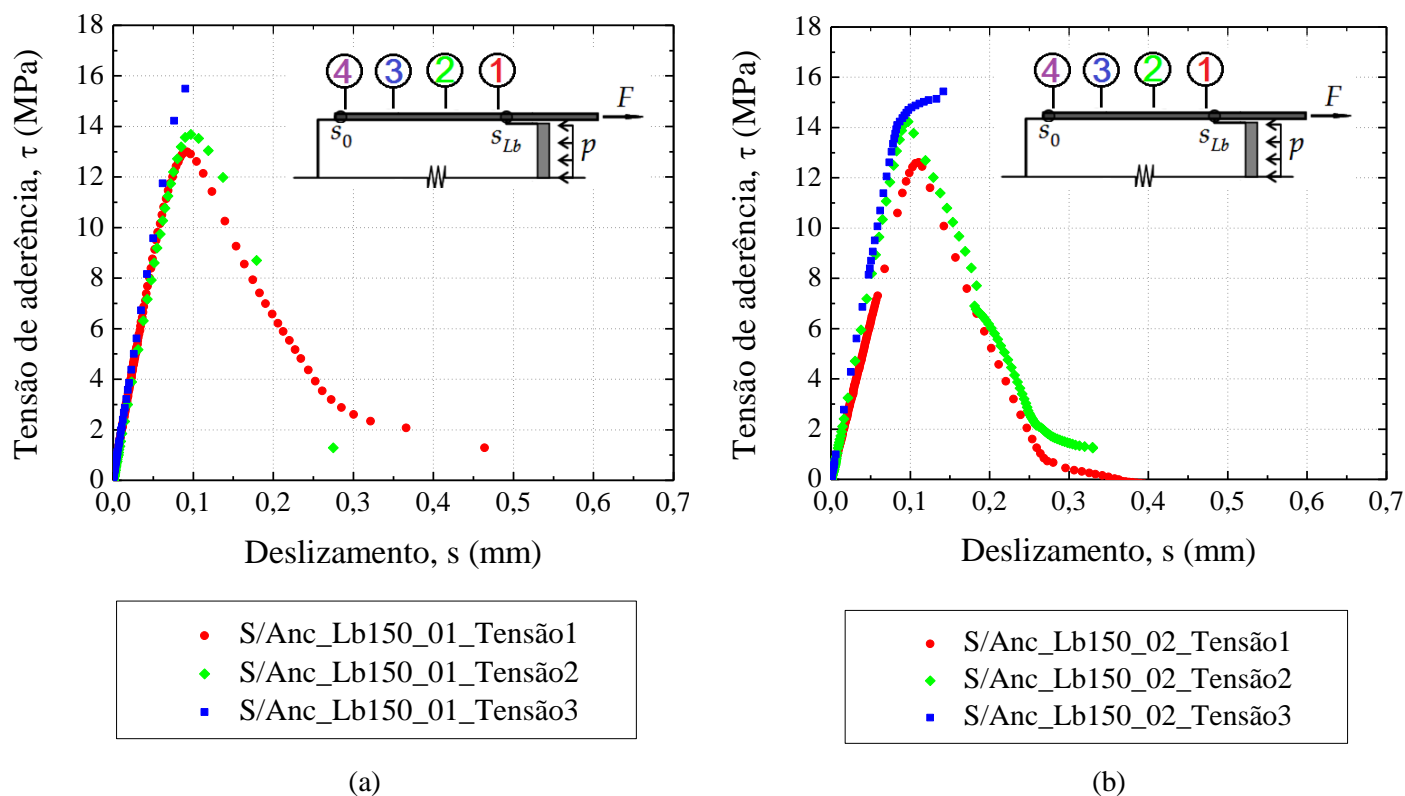


Figura 5.6 - Curva força vs. deslizamento, comparação dos dois ensaios com comprimento colado de 150 mm

O ensaio S/Anc_Lb150_01 atinge o valor de força máxima para deslizamentos menores que o ensaio S/Anc_Lb150_02, apesar de, no início ambos terem respostas muito semelhantes, nota-se uma ligeira diferença após o deslizamento 0,1 mm. Assim, a força máxima no ensaio S/Anc_Lb150_01 foi de 8,9 kN e no ensaio S/Anc_Lb150_02 de 8,6 kN, valores que correspondem, respectivamente, aos deslizamentos de 0,46 mm e 0,52 mm, como se observa na Figura 5.6.

As curvas de tensão de aderência vs. deslizamento dos ensaios S/Anc_Lb150_01 e S/Anc_Lb150_02 apresentam um ramo inicial quase linear alcançando um valor máximo (τ_{\max}) de 13,0 MPa cujo deslizamento máximo (s_{\max}) é 0,09 mm e de 12,6 MPa para um s_{\max} de 0,11 mm, respectivamente, conforme se observa na Figura 5.7. A discrepância de valores de tensão máxima de aderência nestes dois ensaios não é muito alta, tendo uma valor de 3,1 %.



5.1.2. Comprimento colado inferior ao comprimento efetivo

Para comprimentos colados inferiores ao comprimento efetivo obtiveram-se, novamente, curvas experimentais de força vs deslizamento, extensão vs. deslizamento e tensão vs. deslizamento. Em seguida, mostram-se essas curvas para os ensaios com comprimentos colados de: 100 mm (S/Anc_Lb100_01 e S/Anc_Lb100_02); 75 mm (S/Anc_Lb75_01 e S/Anc_Lb75_02) e por 50 mm (S/Anc_Lb50_01, S/Anc_Lb50_02 e S/Anc_Lb50_03).

Para os ensaios de corte simples sem ancoragem mecânica com comprimento colado de 100 mm foram realizados, mais uma vez, dois ensaios nos quais se usaram quatro extensômetros e três extensômetros colados ao longo do comprimento colado do CFRP. Em ambos os ensaios usaram-se ainda dois transdutores de deslocamento que mediram os deslocamento nas extremidades coladas do CFRP (veja-se a Figura 5.8).

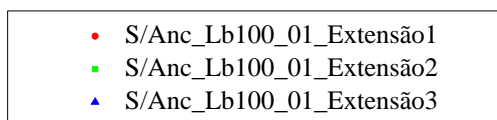
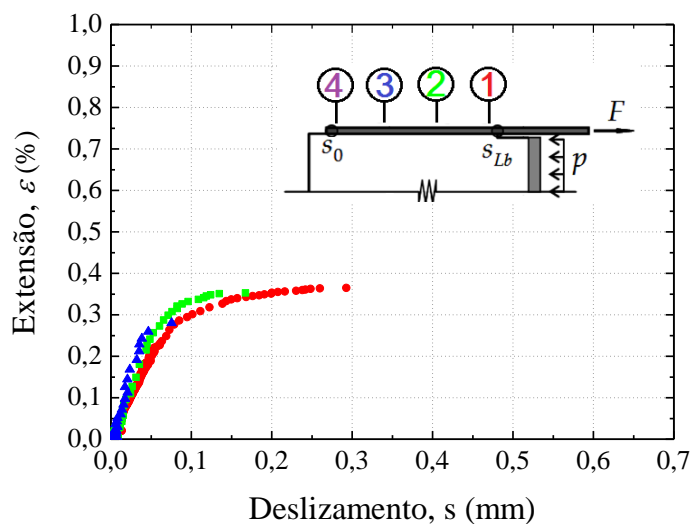


Figura 5.8 – Ensaio de corte simples sem ancoragem mecânica com L_b de 100mm, S/Anc_Lb100_02, 3 extensômetros e 2 defletômetros.

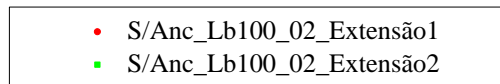
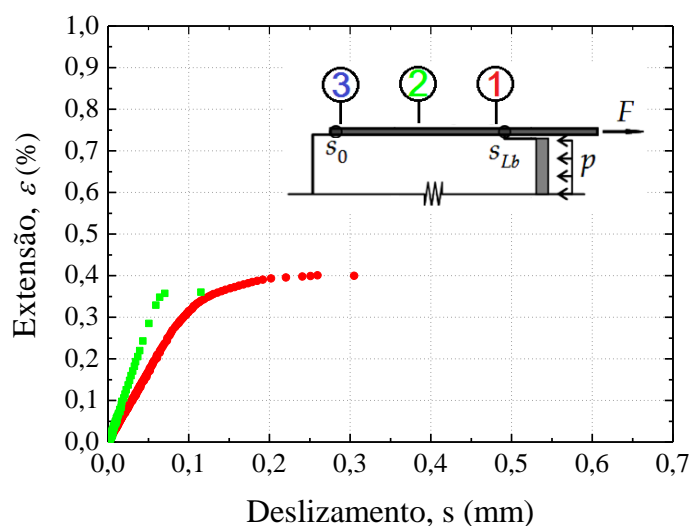
A Figura 5.9 a) e b) mostra que para deslizamentos até 0,08 mm, as curvas extensão vs. deslizamento aumentam quase linearmente. Depois desse valor de deslizamento as extensões crescem de forma menos acentuada atingindo um valor máximo constante para 0,36 % quando o deslizamento é 0,29 mm no caso do ensaio S/Anc_Lb100_01_Extensão1. A curva a vermelho da Figura 5.9 b) refere-se ao ensaio S/Anc_Lb100_02_Extensão1 podendo se observar que a ligação CFRP/aço neste ensaio atingiu um deslizamento máximo de 0,30 mm para uma extensão de rotura de 0,4%.

Na curva força vs. deslizamento da Figura 5.9 c) verifica-se que inicialmente os deslizamentos aumentam quase linearmente com a carga. Nota-se que o ensaio S/Anc_Lb100_01 tem uma rigidez de ligação superior ao S/Anc_Lb100_02, pois toma valores de força superiores para deslizamentos pequenos e inferiores a 0,1 mm. Porém, no deslizamento 0,10 mm, o ensaio S/Anc_Lb100_02 apresenta, identicamente ao ensaio S/Anc_Lb100_01, ligeiro aumento de força. No ensaio S/Anc_Lb100_01 nota-se uma mudança brusca de declive para um deslizamento 0,05 mm, o que pode ser justificada pelo início do descolamento da ligação CFRP/aço. O ensaio S/Anc_Lb100_01 toma o valor máximo de força de 7,9 kN e cujo deslizamento é 0,29 mm e o S/Anc_Lb100_02 tem uma força máxima de 8,2 kN cujo deslizamento é 0,30 mm, os dois ensaios tomam valores muito próximos mas o caminho tomando até eles foi muito diferente.

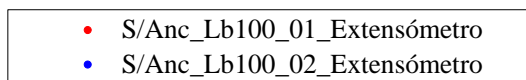
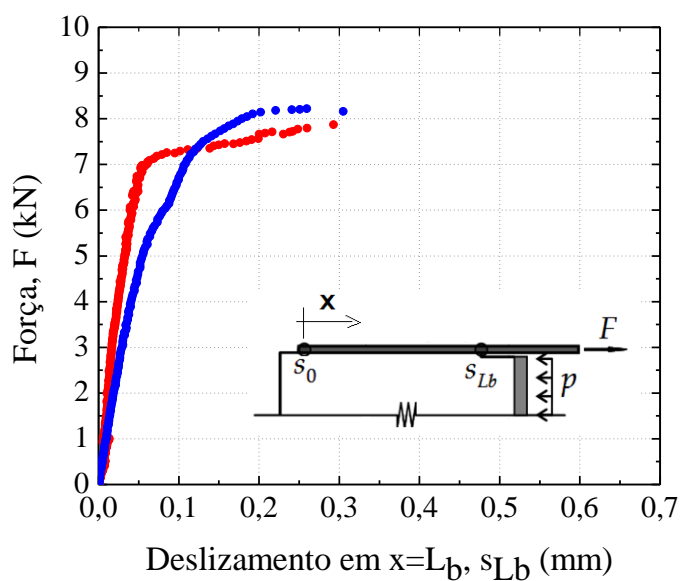
A Figura 5.10 mostra as curvas tensão de aderência vs. deslizamento para os ensaios S/Anc_Lb100_01 e S/Anc_Lb100_02. A tensão máxima experimental para o comprimento colado de 100 mm, toma o valor de 5,3 MPa com um deslizamento ($s_{m\acute{a}x}$) de 0,07 mm no ensaio S/Anc_Lb100_01, e de 17,2 MPa com um deslizamento de 0,11 mm para o ensaio S/Anc_Lb100_02. A discrepância entre estes valores de tensão máxima de aderência é de 69,2 %.



(a)



(b)



(c)

Figura 5.9 - (a) Curva de extensão vs. deslocamento S/Anc_Lb100_01 (b) Curva de extensão vs. deslocamento S/Anc_Lb100_02; (c) Curva força vs. deslocamento, comparação dos dois ensaios com comprimento colado de 100mm.

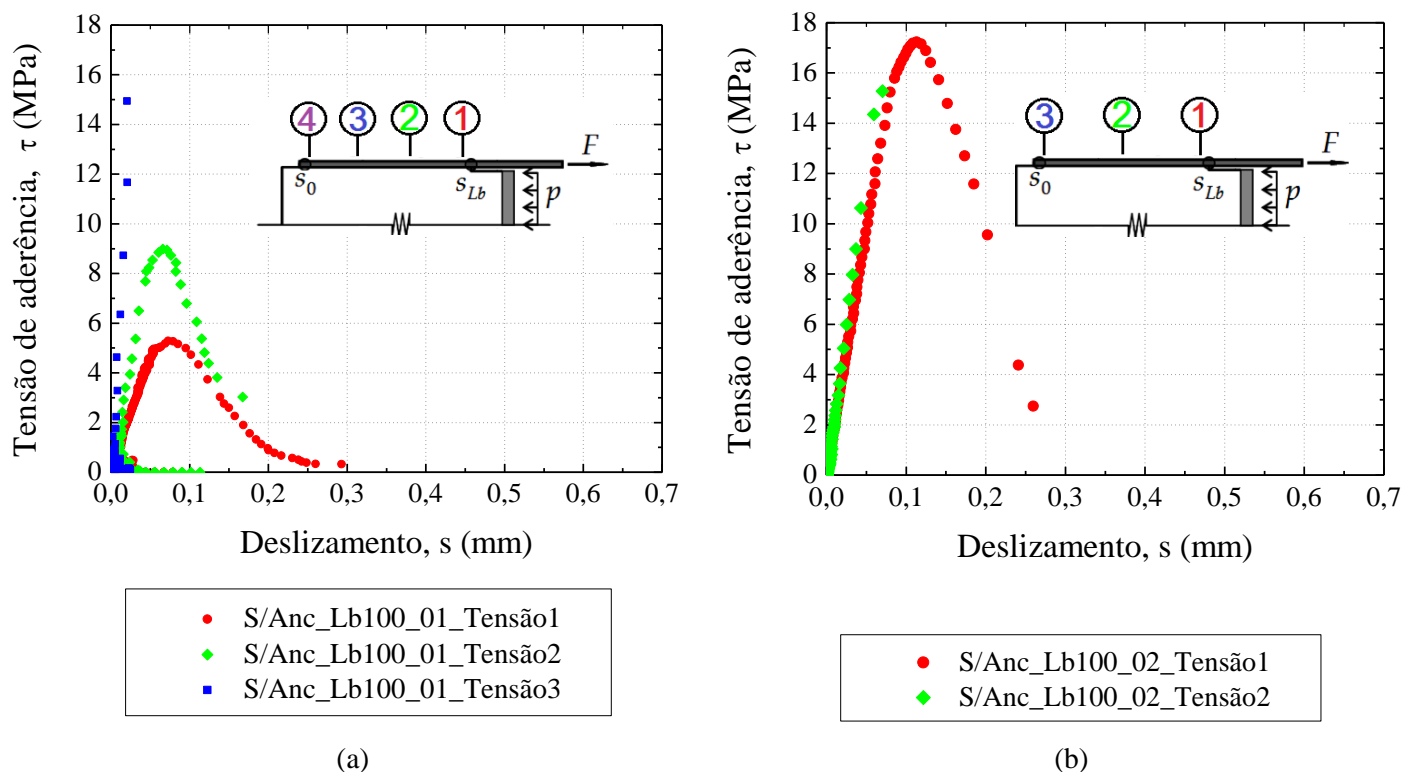


Figura 5.10 - Curvas de tensão de aderência vs. deslizamento (a) S/Anc_Lb100_01 (b) S/Anc_Lb100_02

Para os ensaios de corte simples sem ancoragem mecânica com comprimento colado de 75 mm foram realizados, mais uma vez, dois ensaios nos quais se usaram três extensômetros colados ao longo do comprimento colado do CFRP. Em ambos os ensaios usaram-se ainda dois transdutores de deslocamento que mediram os deslocamento nas extremidades coladas do CFRP (veja-se a Figura 5.11).

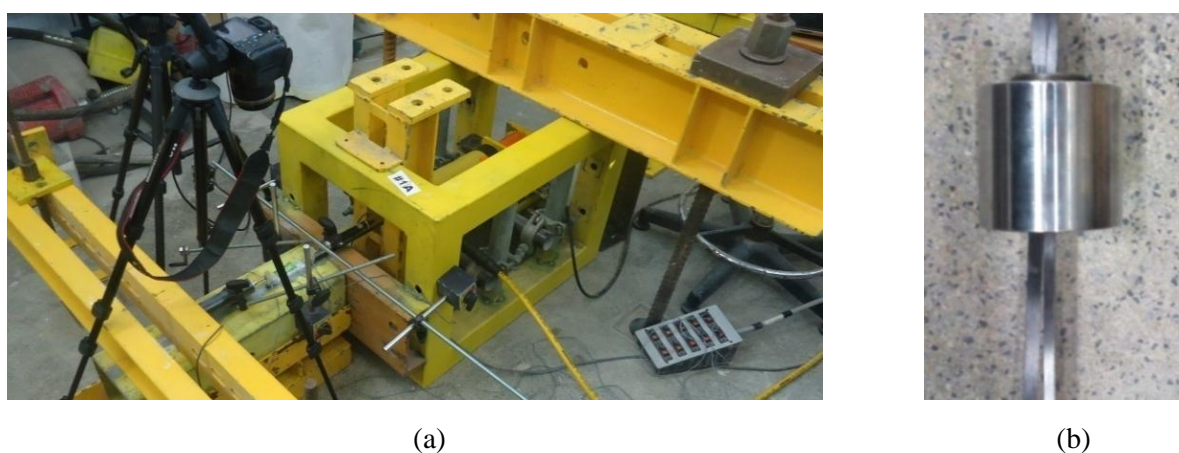


Figura 5.11 - Ensaio de corte simples para um comprimento colado de 75mm: (a) S/Anc_Lb75_01 - 3 extensômetros e 2 defletômetros, (b) S/Anc_Lb75_02 - 3 extensômetros e 2 defletômetros

A extensão máxima atingida pelo ensaio S/Anc_Lb75_01 é 0,36 % cujo deslizamento é de 0,13 mm e a atingida pelo ensaio S/Anc_Lb75_02 é 0,332% para um deslizamento de 0,19 mm, conforme se mostra na Figura 5.12 a) e b).

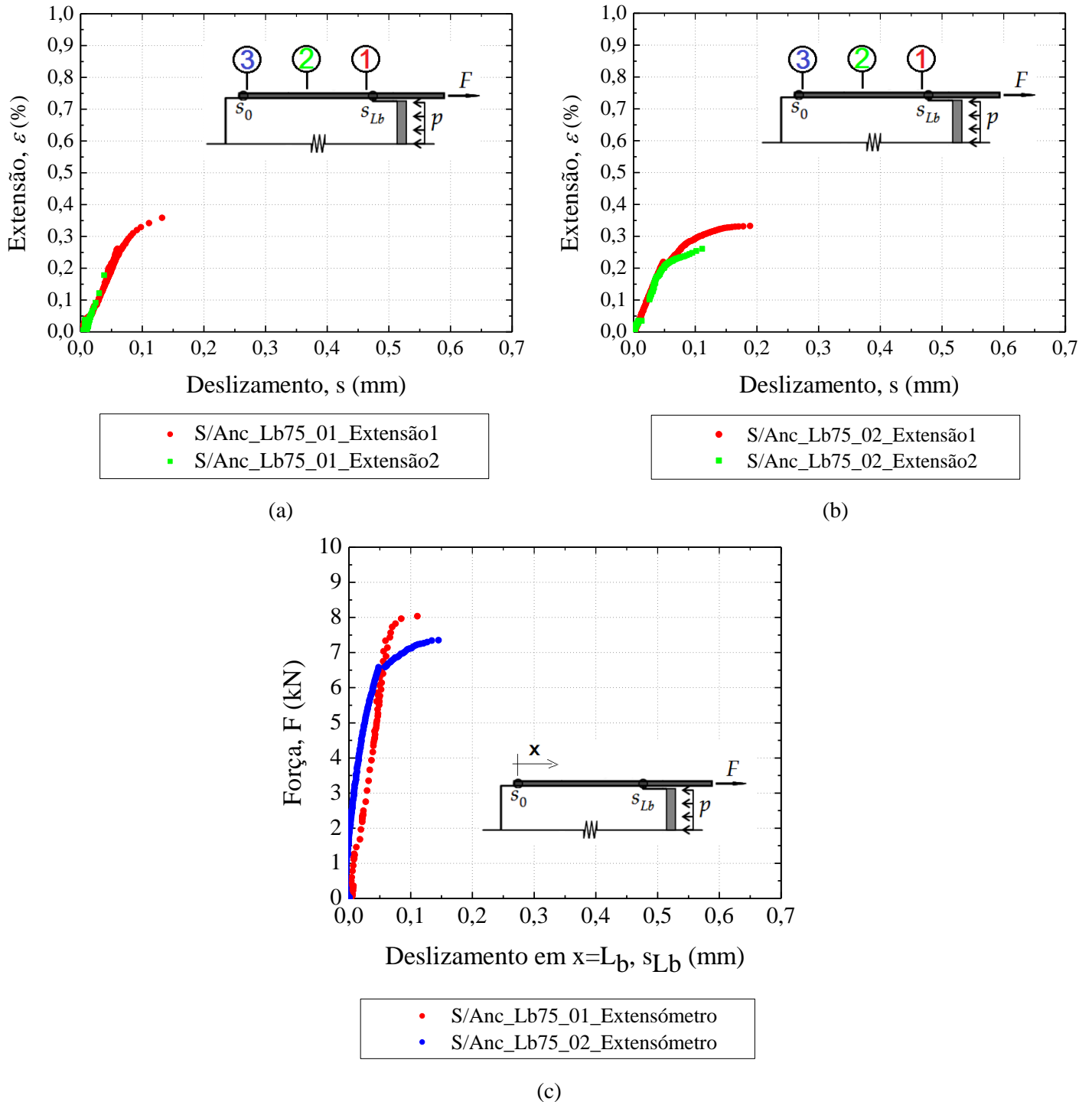


Figura 5.12 - (a) Curvas de extensão vs. deslizamento S/Anc_Lb75_01; (b) Curvas de extensão vs. deslizamento S/Anc_Lb75_02; (c) Curva força vs. deslizamento, comparação dos dois ensaios com comprimento colado de 75mm.

Na curva da Figura 5.12 c) força vs. deslizamento verifica-se o mesmo que se verificou no ensaio anterior, S/Anc_Lb100. Porém, no deslizamento 0,05 mm, o ensaio S/Anc_Lb75_02 tem uma mudança brusca de declive, o que pode ser justificada pelo início do descolamento da ligação CFRP/aço desse mesmo ensaio. O ensaio S/Anc_Lb75_01 toma o valor máximo de força de 8,10 kN e cujo deslizamento é 0,13 mm e o S/Anc_Lb75_02 tem uma força máxima de 7,35 kN cujo deslizamento é 0,19 mm, os dois ensaios tomam valores muito próximos mas o caminho tomando até eles foi muito diferente.

A tensão de aderência máxima experimental do ensaio S/Anc_Lb75_01 toma o valor de 15,5 MPa para um deslizamento máximo ($s_{\text{máx}}$) de 0,09 mm e de 12,4 MPa com um deslizamento de 0,06 mm para o ensaio S/Anc_Lb75_02. Como o comprimento colado é inferior ao comprimento efetivo as curvas tensão de aderência não tem deslizamento último, ficando, assim incompletas.

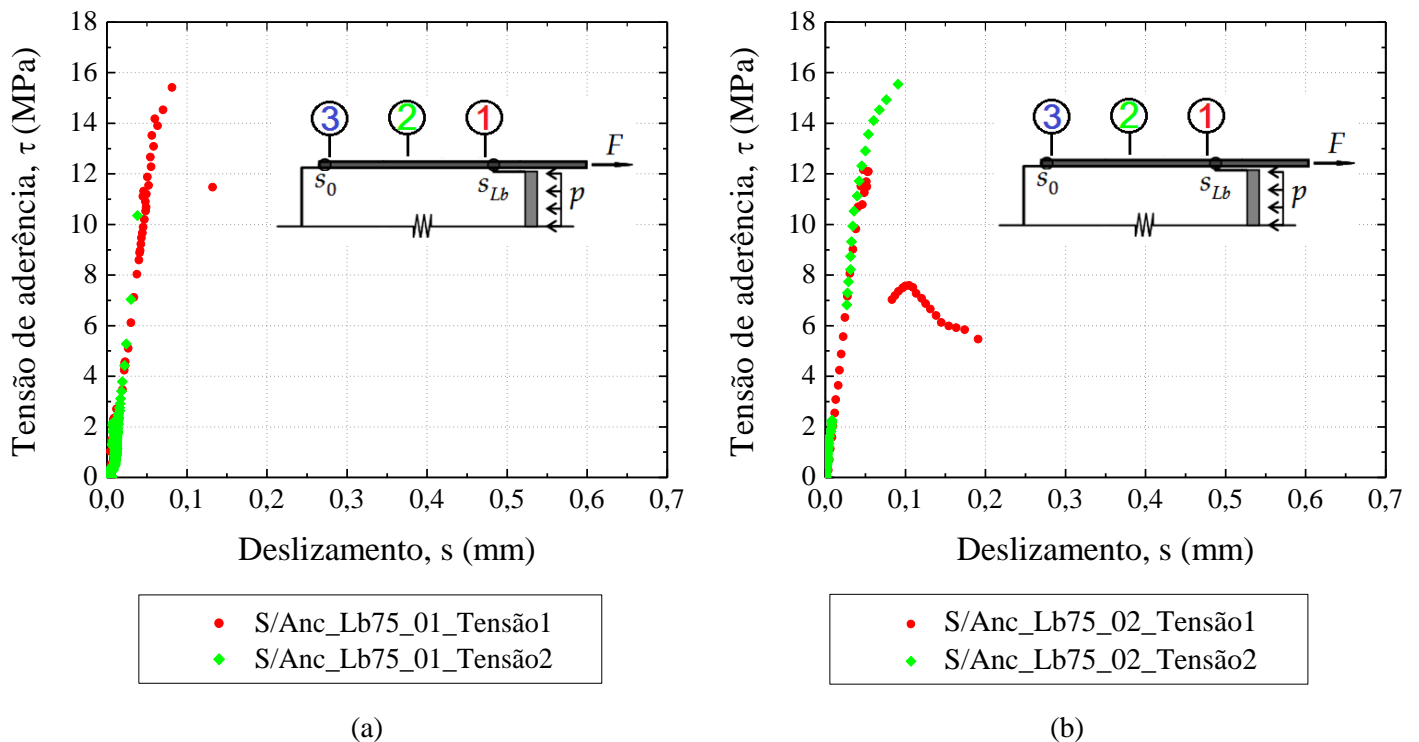
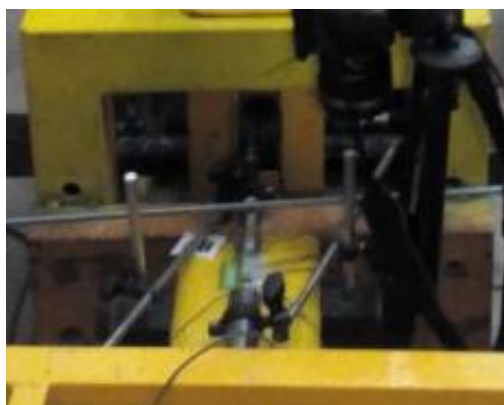


Figura 5.13 - Curvas de tensão de aderência vs. deslizamento (a) S/Anc_Lb75_01 (b) S/Anc_Lb75_02

Por último, os ensaios de corte simples sem ancoragem mecânica com comprimento colado 50 mm, realizaram-se três ensaios e em cada um deles usaram-se sempre três extensômetros ao longo do comprimento colado do CFRP. No ensaio S/Anc_Lb50_01 usaram-se dois transdutores de deslocamento nas extremidades coladas do CFRP, no ensaio S/Anc_Lb50_02 três transdutores de deslocamento, dois deles nas extremidade coladas do CFRP e o outro na vertical medindo o deslocamento da viga metálica na vertical, conforme a Figura 5.14 mostra e no ensaio

S/Anc_Lb50_03 usaram-se, também, dois transdutores de deslocamento nas extremidades coladas do compósito de CFRP.



(a) Ensaio S/Anc_Lb50_01



(b) Ensaio S/Anc_Lb50_02



(c) Ensaio S/Anc_Lb50_03

Figura 5.14 - Ensaio de corte simples com comprimento colado de 50mm: (a) S/Anc_Lb50_01 - 3 extensômetros e 2 LVDT, (b) S/Anc_Lb50_02 - 3 extensômetros e 2 LVDT na horizontais e 1 LVDT na vertical (c) S/Anc_Lb50_03 – 3 extensômetros e 2 LVDT

As curvas extensão vs. deslizamento da Figura 5.15 estão todas com valores de extensão compreendidos entre 0,0% e 0,4% e de deslocamento compreendidos entre 0,0 mm e 0,22 mm. A curva extensão vs. deslizamento da Figura 5.14 a), correspondente ao ensaio S/Anc_Lb50_01, tem um comportamento quase linear até ao deslizamento 0,05 mm, a partir daí tende para um valor constante e máximo de extensão de 0,37 % cujo deslizamento é 0,12 mm. A curva extensão vs. deslizamento da Figura 5.14 b) também tem o mesmo comportamento anteriormente referido, tomando um valor máximo de extensão de 0,35 % para um deslizamento de 0,14 mm. A curva extensão vs. deslizamento da Figura 5.14 c) tem um deslizamento último superior às outras curvas de extensão vs deslizamento, o valor máximo atingido, neste caso, é 0.37% tal como o ensaio S/Anc_Lb50_01 para um deslizamento de 0,22 mm. Neste ensaio de corte simples sem ancoragem

mecânica e com comprimento colado de 50 mm, o valor de extensão máximo atingido experimentalmente foi bastante semelhante nos três ensaios.

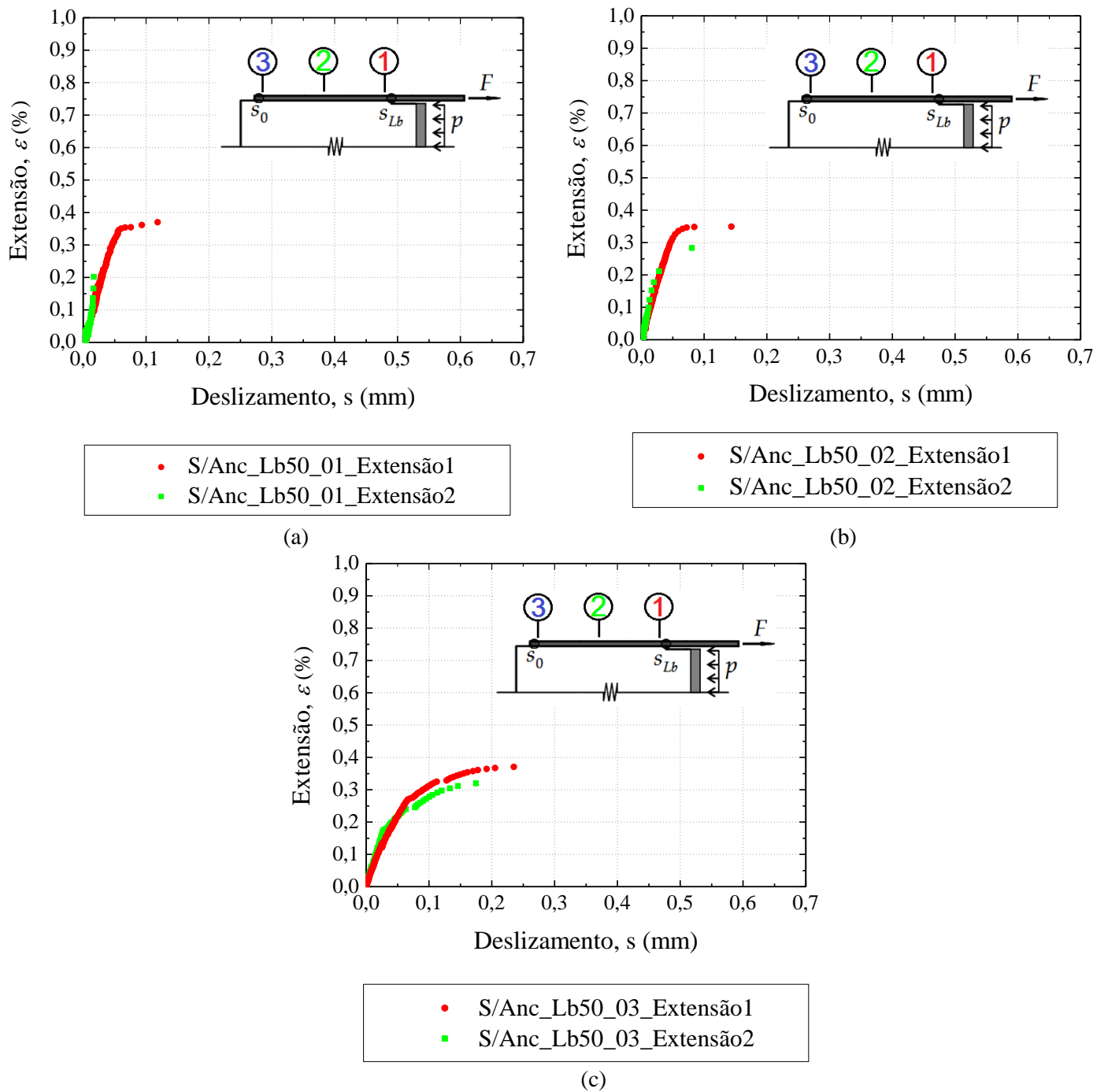


Figura 5.15 - Curvas de extensão vs. deslizamento com comprimento colado de 50mm (a) S/Anc_Lb50_01 (b) S/Anc_Lb50_02 (c) S/Anc_Lb50_03

A Figura 5.16 mostra as curvas força vs. deslizamento dos ensaios de corte simples realizados para o comprimento de 50 mm, nota-se, desde já, a diferença entre ensaios, os ensaios S/Anc_Lb50_01 e S/Anc_Lb50_02 são mais semelhantes entre si e o ensaio S/Anc_Lb50_03 está mais afastado

destes. Os ensaios S/Anc_Lb50_01 e S/Anc_Lb50_02 dão a entender que tem uma rigidez superior ao terceiro ensaio. O ensaio S/Anc_Lb50_01 tem força máxima de 8,4 kN para um deslizamento de 0,12 mm. O ensaio S/Anc_Lb50_02 tem força de 7,6 kN cujo deslizamento é 0,14 mm. E o ensaio S/Anc_Lb50_03 tem o valor mais baixo de força, 7,5 kN para um deslizamento de 0,22 mm.

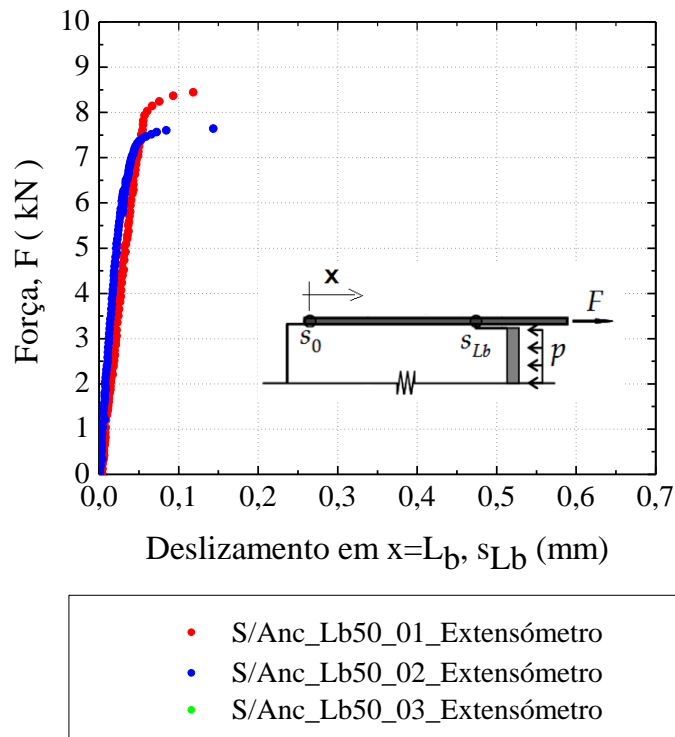
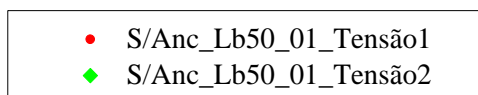
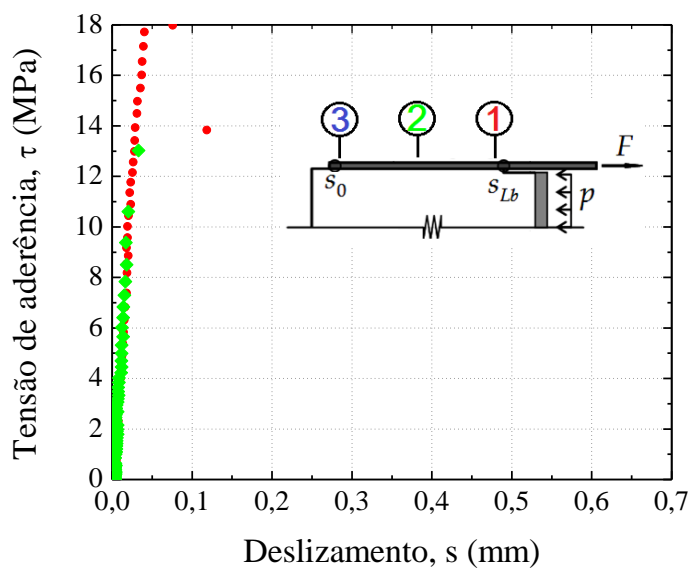
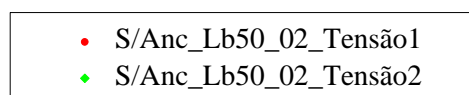
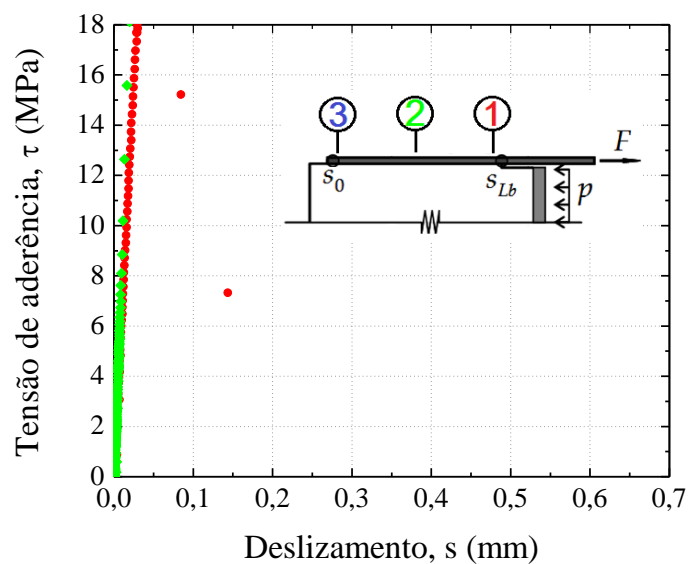


Figura 5.16 - Curva força vs. deslizamento, comparação dos dois ensaios com comprimento colado de 50 mm.

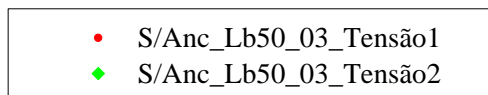
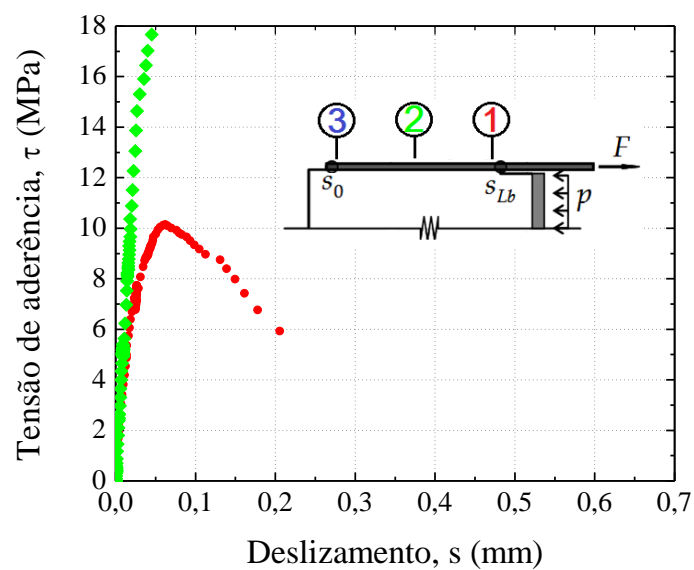
As tensões de aderência vs. deslizamento para comprimentos muito curto, como o caso dos 50 mm da Figura 5.17, dispararam para valores muito altos. No ensaio S/Anc_Lb50_01 da Figura 5.17 a), o valor máximo de tensão de aderência é 20,1 MPa para um $s_{máx}$ de 0,06 mm. No ensaio S/Anc_Lb50_02 é de 25,4 MPa com um $s_{máx}$ de 0,05 mm. E por último, no ensaio S/Anc_Lb50_03 da Figura 5.17 c) é 1,2 MPa para um $s_{máx}$ de 0,05mm.



(a)



(b)



(c)

Figura 5.17 - Curvas de tensão de aderência vs. deslizamento com comprimento colado 50 mm (a) S/Anc_Lb50_01
(b) S/Anc_Lb50_02 (c) S/Anc_Lb50_03

5.2. Modos de rotura observados

Os vários modos de rotura existentes para este tipo de ligação CFRP/aço foram referidos em 2.9, na página 21, sendo que, dos ensaios experimentais o modo predominante de rotura foi adesiva pela interface aço-adesivo. Na Figura 5.18 mostram-se os tipos de falhas e/ou modos de rotura para comprimentos colados superiores ao comprimento efetivo, de cada ensaio com as imagens correspondentes.

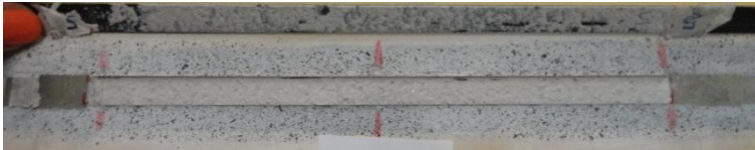



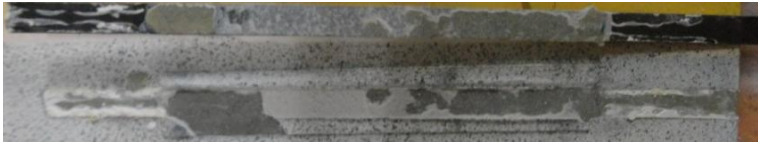

Ensaio	Extremidade livre	Extremidade carregada	Modo de rotura
S/Anc_Lb200_01			Rotura adesiva FRP-adesivo
S/Anc_Lb200_02			Rotura adesiva Aço-adesivo
S/Anc_Lb175_01			Rotura adesiva Aço-adesivo
S/Anc_Lb175_02			Rotura adesiva FRP-adesivo
S/Anc_Lb150_01			Rotura coesiva
S/Anc_Lb150_02			Rotura adesiva Aço-adesivo

Figura 5.18 – Modos de rotura obtidas experimentalmente para comprimentos colados superiores ao comprimento efetivo para ensaios de corte simples sem ancoragem mecânica

Os modos de rotura correspondentes aos comprimentos colados inferiores ao comprimento efetivo de cada ensaio encontram-se na Figura 5.19.

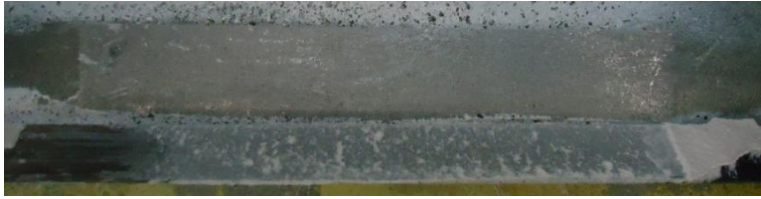



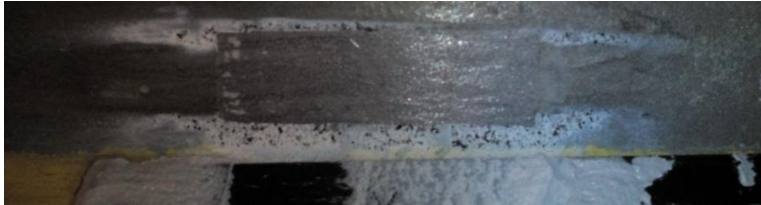





Ensaio	Extremidade livre	Extremidade carregada	Modos de rotura
S/Anc_Lb100_01			Rotura adesiva Aço-adesivo
S/Anc_Lb100_02			Rotura adesiva Aço-adesivo
S/Anc_Lb75_01			Rotura adesiva Aço-adesivo
S/Anc_Lb75_02			Rotura adesiva Aço-adesivo
S/Anc_Lb50_01			Rotura adesiva Aço-adesivo
S/Anc_Lb50_02			Rotura adesiva Aço-adesivo
S/Anc_Lb25_01 / S/Anc_Lb25_02			Rotura adesiva Aço-adesivo
S/Anc_Lb10_01 / S/Anc_Lb10_02			Rotura adesiva Aço-adesivo

Figura 5.19 – Modos de rotura obtidas experimentalmente para comprimentos colados inferiores ao comprimento efetivo para ensaio de corte simples sem ancoragem mecânica.

Todas as amostras, tanto para o comprimento colado superior ao comprimento efetivo como para o comprimento colado inferior ao efetivo, falharam ao longo da interface aço/CFRP com uma pequena quantidade de adesivo agarrada ao longo do CFRP. As amostras tinham entre 1 mm a 2 mm de espessura de camada adesiva e apenas foi notado o modo de rotura adesiva sem qualquer presença de delaminação. Aquando da realização dos ensaios experimentais esperava-se que o modo de rotura fosse pela camada adesiva, pois o substrato é o elemento mais rígido e a resina o elemento mais fraco da ligação.

5.3. Ensaio de corte simples com ancoragem mecânica

Foram realizados quatro ensaios de corte simples com ancoragem mecânica com extensómetros e transdutores de deslocamento conforme a Tabela 4.2 indica.

Os valores de força transmitida ao compósito de CFRP, extensão e deslizamento foram obtidos da monitorização realizada em cada ensaio a partir da célula de carga, dos extensómetros e de transdutores de deslocamento, respectivamente. Os valores de deslizamento em pontos específicos do compósito de CFRP foram obtidos através das leituras realizadas pelos extensómetros, i.e., a partir da expressão:

$$s = \int_0^L \varepsilon dx \quad (5.2)$$

Determinou-se o integral da Eq. (5.2) recorrendo à regra dos trapézios. A partir da expressão (2.25) da página 26, as tensões de aderência foram determinadas em diferentes pontos do compósito de CFRP. Apenas foram realizados quatro ensaios por falta de material, nomeadamente compósito de CFRP. Foram escolhidos os comprimentos colados de 50 mm e 200 mm para abranger toda a gama de comprimentos usados no caso de EBR sem ancoragem mecânica. Assim, o comprimento colado de 50 mm continua a ser inferior ao comprimento efetivo e o comprimento de 200 mm superior ao comprimento efetivo. Os valores experimentais obtidos nos ensaios estão detalhados na Tabela 5.2 para uma melhor compreensão e análise dos gráficos.

Tabela 5.2 - Parâmetros experimentais dos ensaios de corte simples com ancoragem mecânica com $L_{eff} = 110$ mm

Nomeclatura	$F_{m\acute{a}x}$ (kN)	$s_{m\acute{a}x}$ *(mm)	s_{ult} *(mm)	$\tau_{m\acute{a}x}$ **(MPa)	$\epsilon_{m\acute{a}x}$ (-)
Comprimento colado superior ao comprimento efetivo, $L_b > L_{eff}$					
C/Anc_Lb200_01	15,79	0,100	0,91	13,48	0,00532
C/Anc_Lb200_02	21,22	-	-	-	0,00860
Comprimento colado inferior ao comprimento efetivo, $L_b < L_{eff}$					
C/Anc_Lb50_01	24,20	0,017	0,45	4,54	0,00947
C/Anc_Lb50_02	21,38	0,34	0,38	7,38	0,00989

*O $s_{m\acute{a}x}$ corresponde ao deslizamento onde ocorre a tensão máxima e o s_{ult} corresponde ao último deslizamento medido no ensaio experimental.

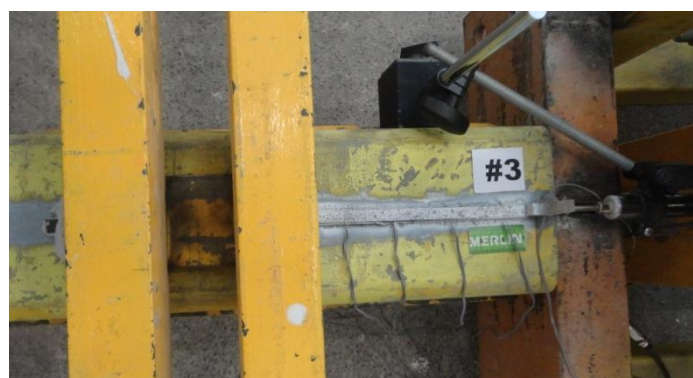
** $\tau_{m\acute{a}x}$ corresponde ao valor máximo de tensão medida na extremidade carregada do compósito, portanto é o valor do primeiro extensômetro.

5.3.1. Comprimento colado superior ao comprimento efetivo

Os ensaios de corte simples com ancoragem mecânica e com comprimento colado de 200 mm têm cinco extensômetros colados ao longo do CFRP e um transdutor de deslizamento (com curso de 25 mm) na extremidade carregada do CFRP. A Figura 5.20 mostra as imagens dos ensaios.



(a) C/Anc_Lb200_01



(b) C/Anc_Lb200_02

Figura 5.20 - Ensaio de corte simples com ancoragem mecânica com comprimento colado de 200 mm (a) C/Anc_Lb200_01 (b) C/Anc_Lb200_02

A curva extensão vs. deslizamento da Figura 5.21 a), tem o mesmo andamento que a curva extensão vs. deslizamento sem ancoragem mecânica para o comprimento de 200 mm até ao deslizamento 0,6 mm, ou seja, aumenta quase linearmente com o aumento da extensão tendendo a seguir para um valor máximo e constante de extensão da ligação, que nos ensaios sem ancoragem

mecânica era o valor máximo da extensão atingido para a ligação, agora nos ensaio com ancoragem mecânica esse valor de extensão toma o valor de extensão máxima do compósito de CFRP, ou seja, o valor de rotura do CFRP, adotando um andamento linear até esse valor.

O ensaio C/Anc_Lb200_01 tem rotura do CFRP para a extensão de 0,53% cujo deslizamento é 0,91 mm e a extensão máxima atingida pelo ensaio C/Anc_Lb200_02 é 0,86 % para um deslizamento de 1,51 mm. Na Figura 5.21 a) observam-se três curvas extensão vs. deslizamento a curva a vermelho (C/Anc_Lb200_01_Extensão1) corresponde à extensão medida na extremidade carregada do CFRP, a curva a preto (C/Anc_Lb200_01_Extensão5) mede a extensão na extremidade ancorada e a curva a azul (C/Anc_Lb200_01_Integral tensões) corresponde ao integral das tensões de aderência medidas durante o ensaio C/Anc_Lb200_01. A curva extensão vs. deslizamento da Figura 5.21 b), C/Anc_Lb200_02, tem um andamento quase sempre linear para qualquer valor de deslizamento não tomando o andamento esperado.

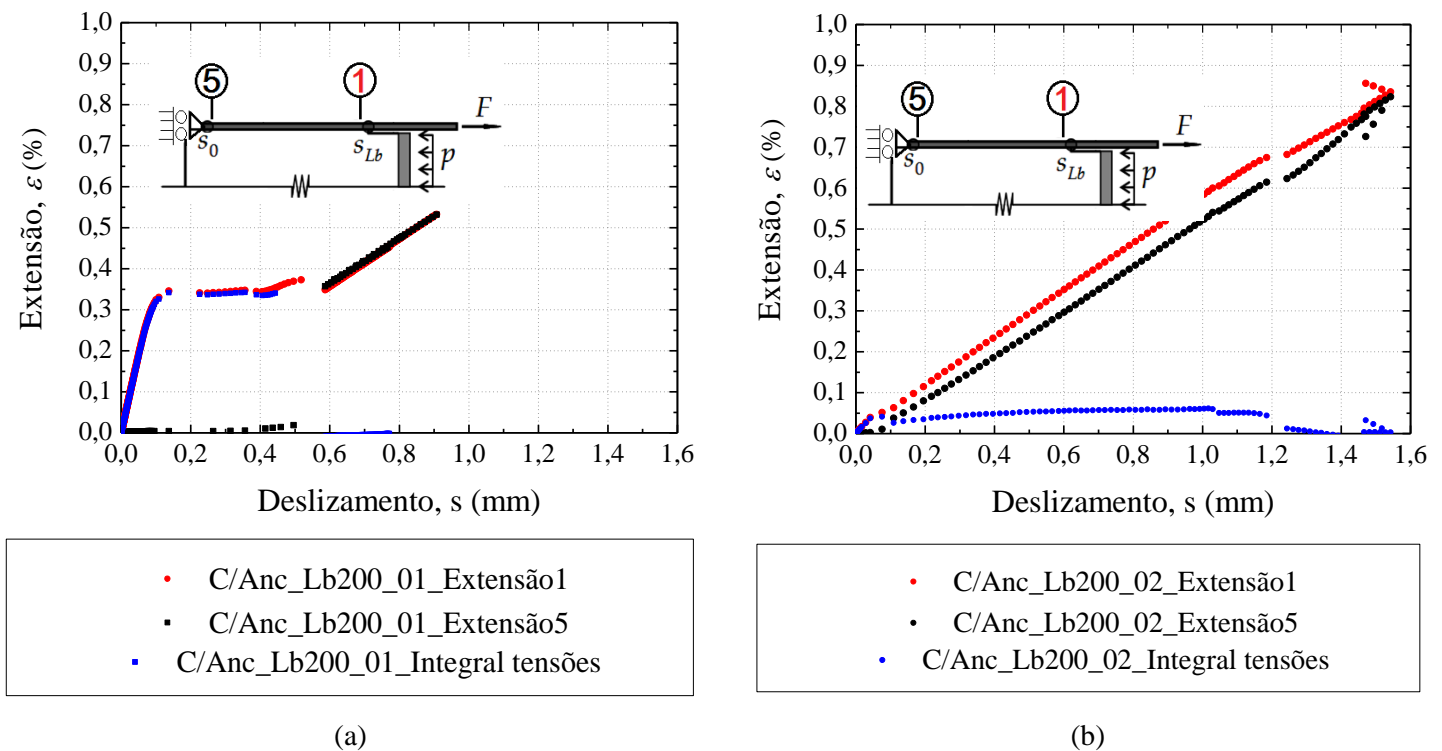
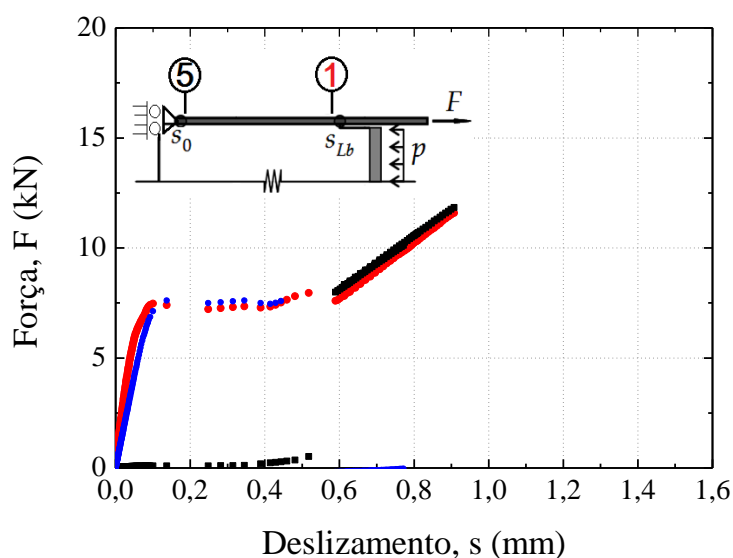


Figura 5.21 – Curvas extensão vs. deslizamento ensaio de corte simples com ancoragem mecânica com L_b 200mm

(a) C/Anc_Lb200_01 (b) C/Anc_Lb200_02

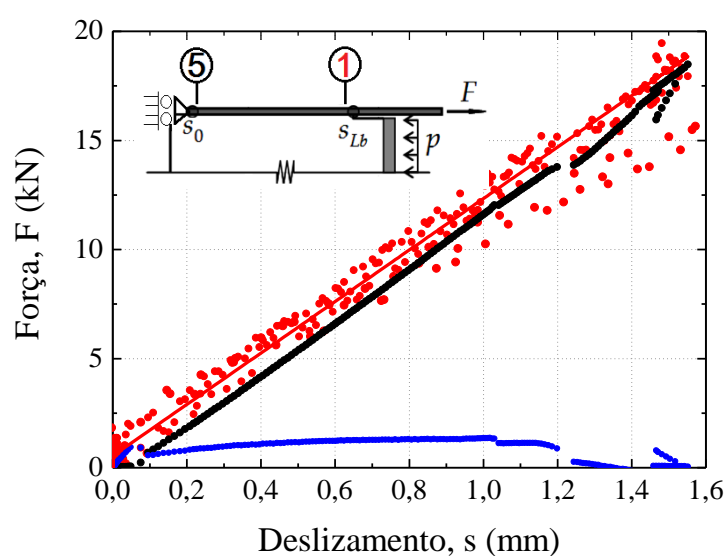
A curva força vs. deslizamento da Figura 5.22 a) mostra o mesmo que a curva extensão vs. deslizamento da Figura 5.21, i.e. inicialmente, os deslizamentos aumentam quase linearmente com a carga até ao deslizamento de 0,1 mm, a partir desse deslizamento os valores de carga tendem para um valor constante de aproximadamente 7,5 kN e após um deslizamento de

0,6 mm a carga aumenta linearmente com o deslizamento. A curva força vs. deslizamento da Figura 5.22 b) é quase sempre linear para qualquer valor de deslizamento.



- C/Anc_Lb200_01_Força 1
- C/Anc_Lb200_01_Reação 5
- C/Anc_Lb200_01_Integral tensões

(a)

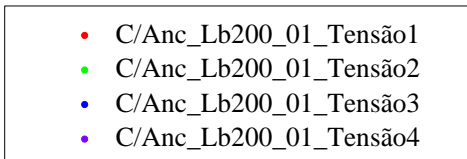
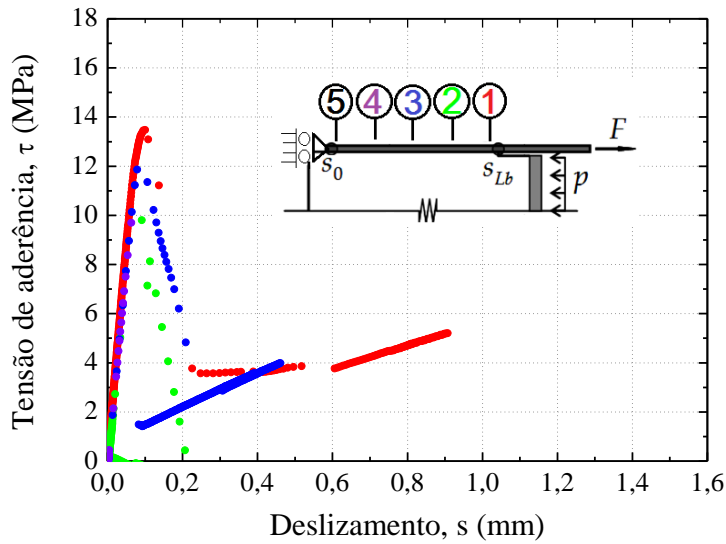


- C/Anc_Lb200_02_Força 1.
- C/Anc_Lb200_02_Reação 5
- C/Anc_Lb200_02_Integral
- C/Anc_Lb200_02_Força 1 Linha.Tend.

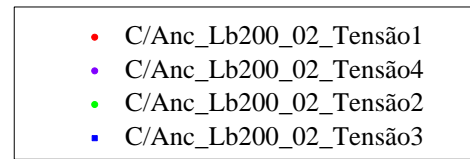
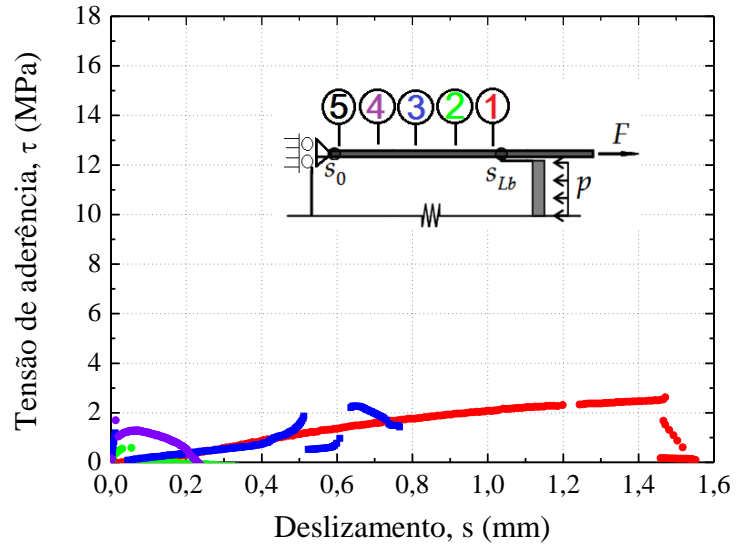
(b)

Figura 5.22 – Curvas força vs. deslizamento ensaio de corte simples com ancoragem mecânica, L_b 200 mm

Relativamente às curvas de tensão de aderência vs. deslizamento apresentados na Figura 5.23 a), estas têm um trecho inicial quase linear até alcançarem um valor de pico e depois descem, também, quase linearmente para um determinado valor. O pico ou o ponto máximo nestas curvas corresponde à tensão de aderência máxima e cujo deslizamento toma vulgarmente, a designação de deslizamento máximo, $s_{máx}$. A tensão de aderência máxima experimental obtida com comprimento colado de 200 mm para o ensaio C/Anc_Lb200_01, é 13,4 MPa e cujo deslizamento máximo ($s_{máx}$) é 0,10 mm. A curva de tensão de aderência vs. deslizamento correspondente ao ensaio C/Anc_Lb200_02 toma diferentes andamentos dos explicados nesta dissertação e que não serão interpretados.



(a)



(b)

Figura 5.23 – Curvas de tensão de aderência vs. deslizamento ensaio de corte simples com ancoragem mecânica, $L_b = 200$ mm (a) C/Anc_Lb200_01 (b) C/Anc_Lb200_02

5.3.2. Comprimento colado inferior ao comprimento efetivo

No ensaio de corte simples com ancoragem mecânica com comprimento colado de 50 mm inferior ao comprimento efetivo usaram-se três extensômetros ao longo do comprimento colado de CFRP e um transdutor de deslocamento na extremidade carregada do compósito de CFRP em ambos os ensaios, como mostra a Figura 5.24.



(a) C/Anc_Lb50_01



(b) C/Anc_Lb50_02

Figura 5.24 – Ensaio de corte simples com ancoragem mecânica com comprimento colado de 50 mm (a) C/Anc_Lb50_01 (b) C/Anc_Lb50_02

A Figura 5.25 mostra as curvas extensão vs. deslizamento para comprimento colado de 50 mm com ancoragem mecânica dos ensaios C/Anc_Lb50_01 e C/Anc_Lb50_02. Nos ensaios com ancoragem mecânica e com comprimentos colados inferiores ao comprimento efetivo o andamento das curvas extensão vs. deslizamento, inicialmente, é não linear e posteriormente torna-se linear, tendendo para a rigidez axial do CFRP. Em ambos os ensaios realizados isso se verifica, porém mais visível para o ensaio C/Anc_Lb50_01 do que para o C/Anc_Lb50_02. A rotura do CFRP para o ensaio C/Anc_Lb50_01 dá-se para uma extensão de 0,95 % e cujo deslizamento é 0,45 mm. No ensaio C/Anc_Lb50_02, o FRP tem uma rotura de 0,99 % para um deslizamento de 0,38 mm.

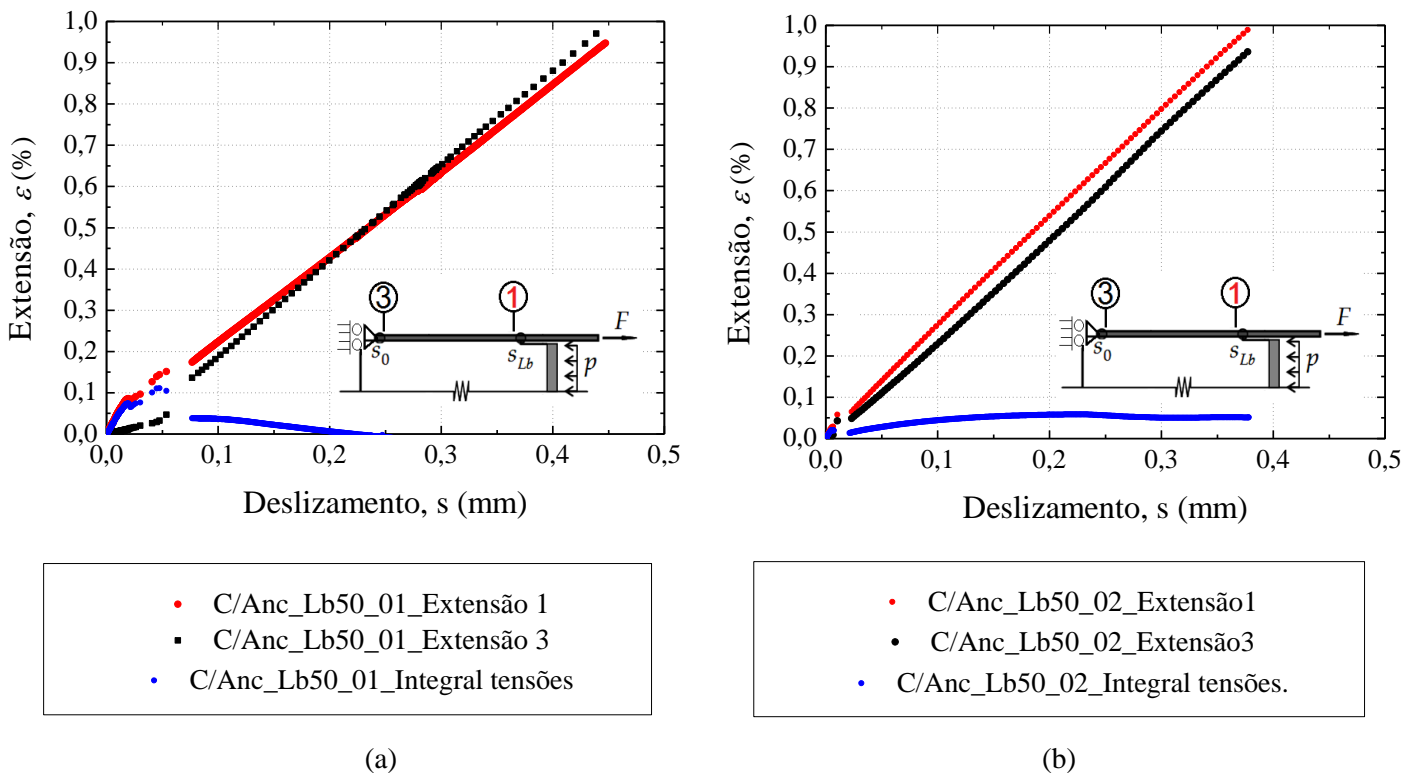


Figura 5.25 – Curvas extensão vs. deslizamento ensaio de corte simples com ancoragem mecânica com comprimento colado de 50 mm (a) C/Anc_Lb50_01 (b) C/Anc_Lb50_02

A Figura 5.26 a) e b) apresenta as curvas força vs. deslizamento correspondentes aos ensaios C/Anc_Lb50_01 e C/Anc_Lb50_02. Estas, também, têm o mesmo andamento que as curvas extensão vs. deslizamento anteriormente referidas. A rotura do CFRP para o ensaio C/Anc_Lb50_01 dá-se para uma força de 24,0 kN e cujo deslizamento é 0,45 mm. No ensaio C/Anc_Lb50_02, o FRP tem uma rotura para uma força de 21,4 kN para um deslizamento de 0,38 mm. As curvas de tensão de aderência vs. deslizamento apresentados na Figura 5.26 c) e d) têm um troço inicial quase linear até alcançarem um valor de pico e depois descem, também, quase linearmente para zero. A tensão de aderência máxima experimental obtida com comprimento colado de 50 mm para o ensaio C/Anc_Lb50_01, é 4,54 MPa e cujo deslizamento máximo ($s_{m\acute{a}x}$) é

0,02 mm e para o ensaio C/Anc_Lb50_02 a tensão de aderência máxima é 7,38 MPa para um deslizamento de 0,34 mm.

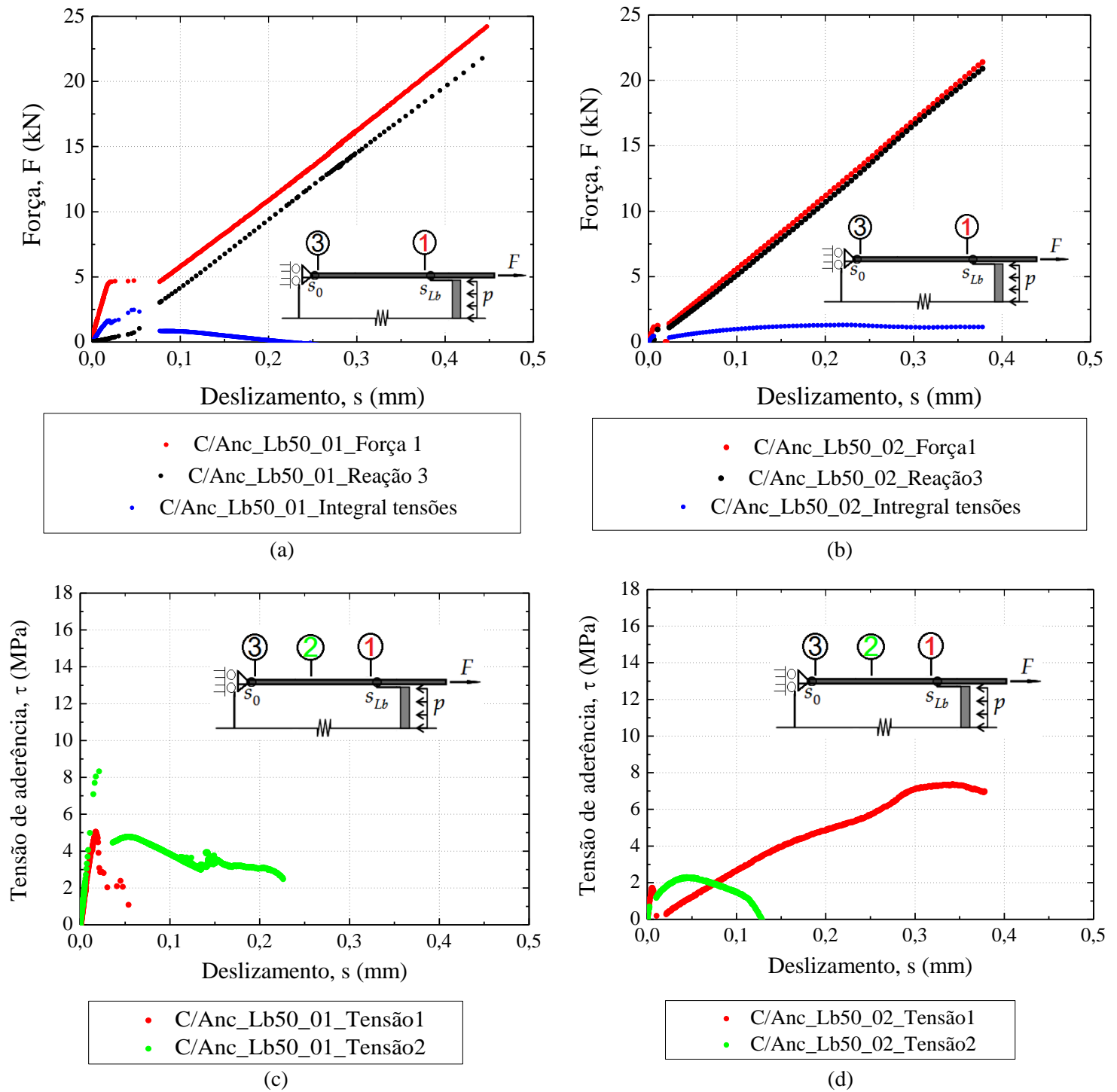


Figura 5.26 – Curvas força vs. deslocamento (a) C/Anc_Lb50_01 (b) C/Anc_Lb50_02 e curva de tensão de aderência vs. deslocamento (c) C/Anc_Lb50_01 (d) C/Anc_Lb50_02

5.4. Modos de rotura obtidos

Para a ligação ancorada mecanicamente a rotura acontece pelo compósito CFRP, ou seja, a ligação rompe imediatamente depois do local ancorado pelo CFRP. Na Figura 5.27 mostram-se os modos de rotura obtidos nos ensaios experimentais de corte simples com ancoragem mecânica.




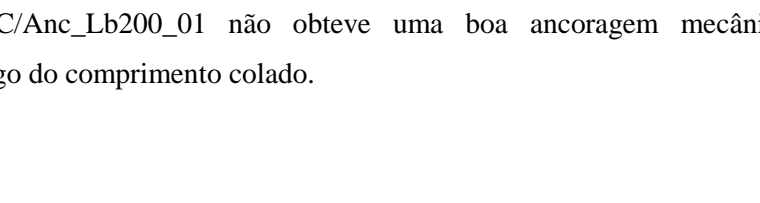


Nome	Extremidade livre	Extremidade carregada	Modos de rotura
C/Anc_Lb50_01			Rotura do compósito CFRP
C/Anc_Lb50_02			Rotura do compósito CFRP
C/Anc_Lb200_01			Rotura prematura do compósito CFRP
C/Anc_Lb200_02			Rotura do compósito CFRP

Figura 5.27 – Modos de rotura obtidas experimentalmente para os ensaios de corte simples com ancoragem mecânica.

Todos os ensaios realizados com ancoragem mecânica tiveram o modo de rotura pelo compósito de FRP, porém o ensaio C/Anc_Lb200_01 teve uma rotura menos habitual, sofreu delaminação porque o ensaio C/Anc_Lb200_01 não obteve uma boa ancoragem mecânica e sofreu deslizamento ao longo do comprimento colado.

Capítulo 6

Validação do modelo analítico proposto

6.1. Ensaaios de corte simples sem ancoragem mecânica

O presente capítulo refere-se à análise dos resultados obtidos a partir dos ensaios experimentais sobrepostos com o modelo analítico não linear, tanto para os ensaios de corte simples sem ancoragem mecânica como para os ensaios de corte simples com ancoragem mecânica. Em ambos os ensaios de corte simples fez-se interpretações gráficas para os diferentes comprimentos colados com os devidos comentários.

6.1.1. Lei de *bond-slip*

A partir das Eqs. (3.16), (3.17) e (3.22) construíram-se as curvas analíticas extensão vs. deslizamento e tensão de aderência vs. deslizamento.

Com a Eq. (2.26) da página 26, determinou-se a lei de *bond-slip* de cada ensaio experimental realizado tendo-se obtido os valores de A e B correspondentes a cada ensaio. Note-se que nesse procedimento se considera apenas os ensaios cujos comprimentos colados são superiores ao comprimento efetivo, i.e., os ensaio com $L_b > L_{eff}$. A sobreposição de todas as curvas permitiram definir uma lei de *bond-slip* média conforme se mostra pela Figura 6.1. A partir desta lei de *bond-slip* média determinaram-se as curvas seguintes:

- (i) deslizamento vs. comprimento colado;
- (ii) extensão vs. comprimento colado;
- (iii) tensão de aderência vs. comprimento colado;
- (iv) extensão vs. deslizamento;
- (v) força vs. deslizamento;
- (vi) Força no substrato vs. comprimento colado ($L_b = 200$ mm e $L_b = 50$ mm).

A Tabela 6.1 indica os resultados obtidos para cada ensaio de corte simples realizado tendo por base o modelo *bond-slip* proposto por Dai et al. [29]. Nota-se ainda na Tabela 6.1 que o valor máximo de tensão de aderência obtido foi de 11,9 MPa e o valor mínimo foi de 7,19 MPa.

Por conseguinte, a lei *bond-slip* média foi sempre utilizada nas análises e comparações realizadas daqui em diante. Assim a curva *bond-slip* média fica definida com $\bar{B} = 12,26 \text{ mm}^{-1}$, $\bar{A} = 0,37 \%$, $\bar{s}_{max} = 0,057 \text{ mm}$, $\bar{s}_{ult,0,5} = 0,36 \text{ mm}$, $\bar{G}_f = 1,52 \text{ N/mm}$ e $\bar{\tau}_{m\acute{a}x} = 9,29 \text{ MPa}$. A Figura 6.1 mostra a lei de *bond-slip* média onde se verifica que o valor de pico desta até ao valor de pico máximo da zona a cinzento tem um desvio de 29% e um desvio de 22% para o valor mais baixo dessa mesma zona. Esta discrepância de valores vai influenciar algumas análises realizadas em seguida.

Tabela 6.1 – Parâmetros da *bond-slip* para cada ensaio com comprimento colado superior ao comprimento efetivo e lei de *bond-slip* média

Ensaio	L_b (mm)	A (-)	B (mm^{-1})	s_{max} (mm)	$s_{ult,0,5}$ (mm)	G_f (N/mm)	$\tau_{m\acute{a}x}$ (MPa)
S/Anc_Lb200_02	200	0,0033	13,84	0,050	0,43	1,23	8,52
S/Anc_Lb175_01	175	0,0038	11,62	0,060	0,20	1,62	9,39
S/Anc_Lb175_02	175	0,0034	11,52	0,059	0,37	1,25	7,19
S/Anc_Lb150_01	150	0,0042	12,38	0,057	0,35	1,92	11,90
S/Anc_Lb150_02	150	0,0038	11,97	0,059	0,40	1,61	8,89
Bond-slip média	>100	0,0037	12,26	0,057	0,36	1,52	9,29

Para a validação do modelo analítico proposto sobrepõem-se as curvas teóricas referidas atrás obtidas experimentalmente e já analisadas no capítulo 5. A organização e apresentação de resultados deste capítulo é semelhante à do Capítulo 5, i.e., apresenta primeiro as curvas para comprimentos colados superiores ao comprimento efetivo e em seguida os comprimentos colados inferiores ao comprimento efetivo. E acrescentam-se as distribuições das forças ao longo do comprimento colado dentro do respectivo subcapítulo.

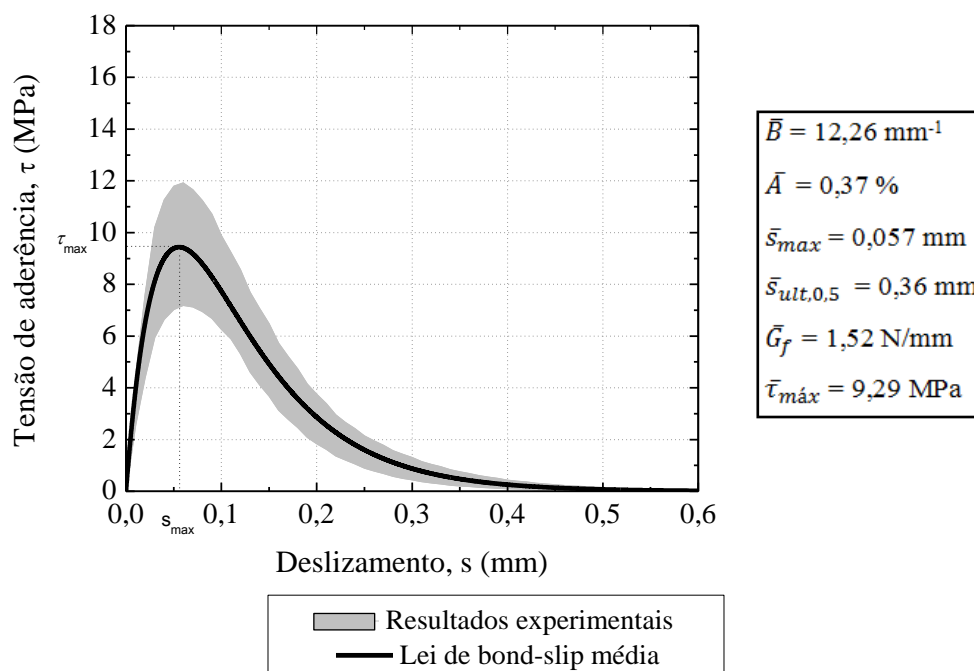


Figura 6.1 – Lei de *bond-slip* média e área experimental dos ensaios de corte simples

6.1.2. Comprimento colado superior ao comprimento efetivo

As curvas analíticas extensão vs. deslizamento, força vs. deslizamento e tensão de aderência vs. deslizamento foram obtidas com base na lei de *bond-slip* média fazendo-se a respectiva comparação com os resultados experimentais apresentados em 5.1.1 para o caso do provete com comprimento colado de 200 mm. A Figura 6.2 a) corresponde à curva extensão vs. deslizamento, enquanto a Figura 6.2 b) mostra a curva força vs. deslizamento.

Quando o deslizamento é 0,09 mm o erro relativo entre as extensões (analítica e experimental) é de 16,0%. No entanto, este erro diminui para 9,75% já numa fase mais avançada do ensaio cujo deslizamento da ligação $x = L_b$ é 0,59 mm. Esta diferença da curva extensão vs. deslizamento teórica para a experimental pode ficar a dever-se a uma menor aproximação entre as curvas *bond-slip* média e experimental (veja-se a Figura 6.3).

Verifica-se um andamento semelhante entre a curva analítica e as curvas experimentais extensão vs. deslizamento. Porém entre o deslizamento 0,05 mm e 0,12 mm a curva extensão vs. deslizamento experimental permanecem com a mesma inclinação inicial, após alcançarem a extensão máxima mudam drasticamente de inclinação tomando sempre o mesmo valor de extensão formando assim um patamar constante, no entanto a curva extensão vs. deslizamento teórica não se comporta dessa maneira. Ainda assim a curva extensão vs. deslizamento teórica tem uma boa aproximação com a experimental.

Quanto à curva força vs. deslizamento representada na Figura 6.2 b), inicialmente, a inclinação experimental é muito superior que a inclinação teórica e a rotura da ligação acontece para um valor muito mais baixo de força, apesar de em ambas verificar-se o patamar constante de força. O erro correspondente ao deslizamento 0,09 mm é de 31,8% e para o deslizamento de rotura experimental, 0,59 mm o erro é de 10,5%.

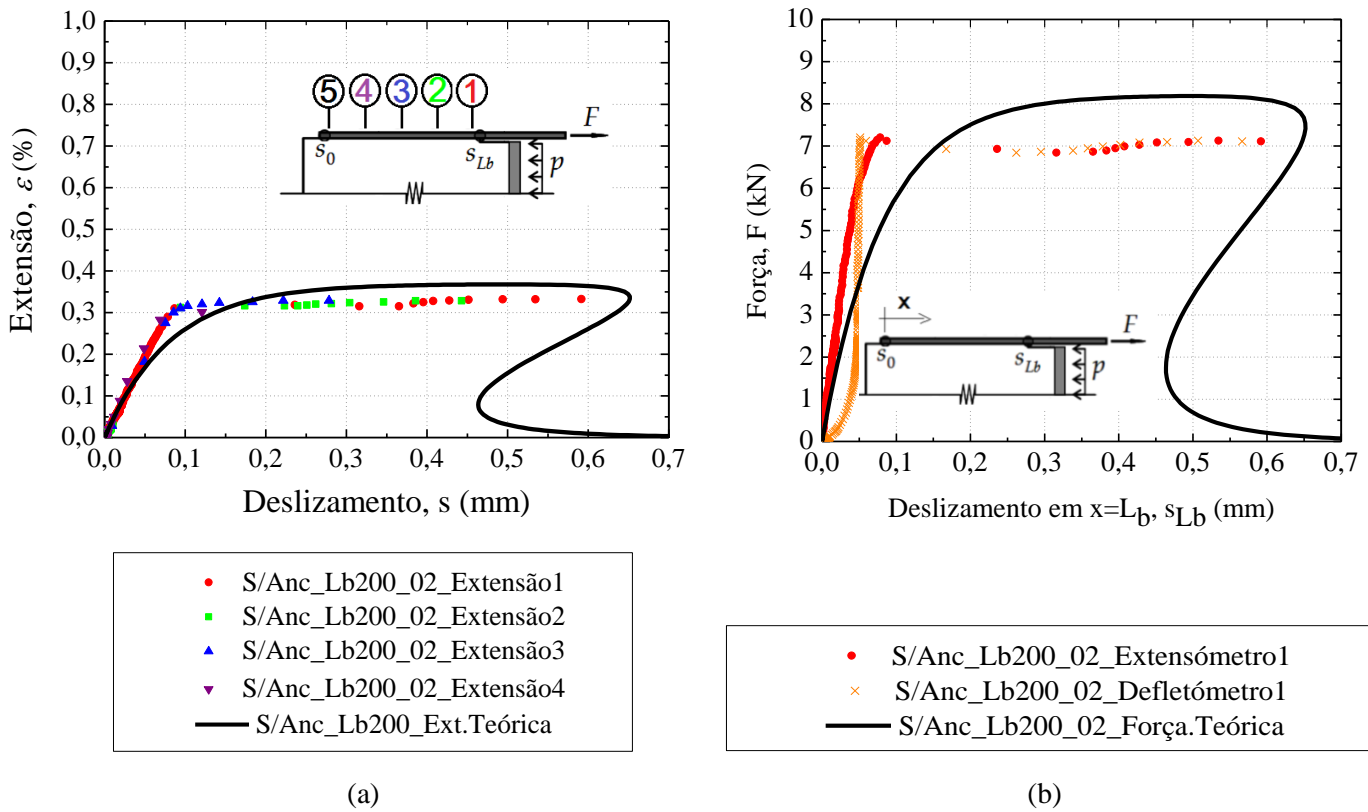


Figura 6.2 – Ensaio de corte simples com ancoragem mecânica para comprimento colado 200mm (a) curvas extensão vs. deslizamento teórica e experimentais (b) curvas força vs. deslizamento teórica e experimental

As discrepâncias analisadas entre os ensaios experimentais e o modelo analítico são provocadas pela aproximação feita na curva tensão de aderência vs. deslizamento da Figura 6.3. Verifica-se que, inicialmente o andamento da curva *bond-slip* média corresponde com o experimental, a partir do deslizamento máximo, s_{max} de 0,055 mm, o ensaio experimental toma valores de tensão de aderência superiores ao teórico, com um erro de 66,8 %. Este erro conduz aos restantes erros anteriormente analisados.

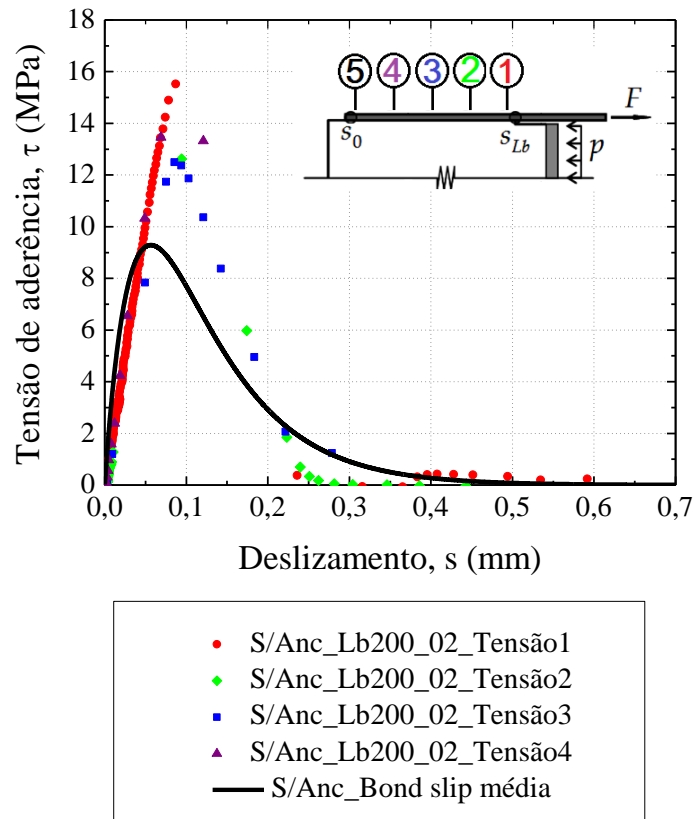


Figura 6.3 – Curvas tensão de aderência vs. deslizamento teórica e experimentais para ensaio de corte simples sem ancoragem mecânica, Lb 200mm

O modo de rotura observado neste ensaio caracteriza-se essencialmente pelo deslizamento entre a resina e o aço, conforme mostra a Figura 6.4. Para analisar a distribuição das forças ao longo do comprimento colado foram escolhidos diferentes valores de deslizamento na extremidade carregada do compósito de CFRP. Esses pontos estão identificados na Figura 6.5 para a curva *bond-slip* média analítica e para a curva força vs. deslizamento com comprimento colado de 200 mm.

A esses pontos do ensaio S/Anc_Lb200_02 foram atribuídas diferentes cores para melhorar a compreensão dos resultados. Por exemplo, para o deslizamento $s_0 = 0.057$ mm, ponto B, a lei de *bond-slip* atinge o valor máximo de 9.29 MPa e o valor da força para esse mesmo ponto é de 4.12 kN. A partir das expressões (3.14), (3.16) e (3.17) da página 36 realizaram-se as curvas teóricas, relativamente a deslizamentos, extensões e tensões de aderência ao longo do comprimento colado (veja-se a Figura 6.6).



Figura 6.4 – Rotura adesiva do aço com a resina, ensaio de corte simples sem ancoragem mecânica com comprimento colado 200mm.

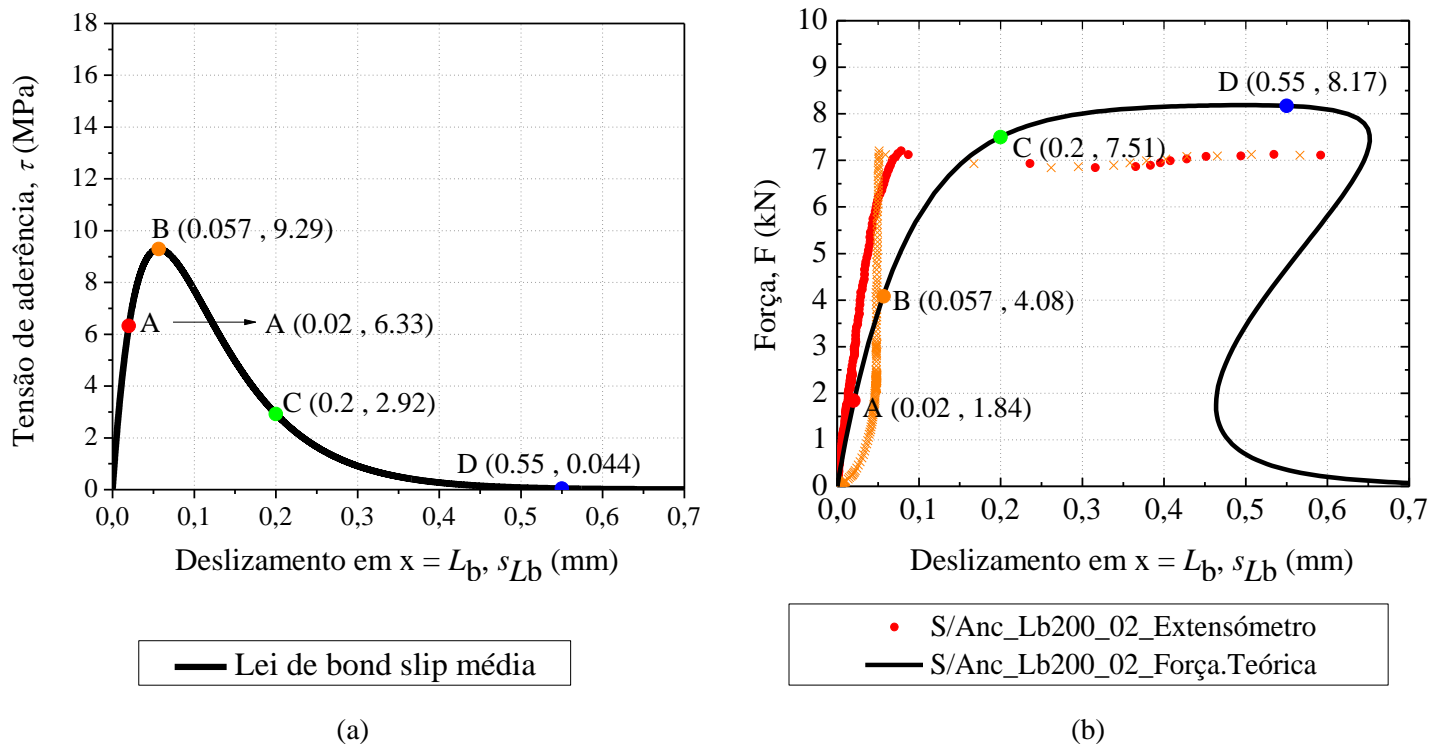


Figura 6.5 – Comprimento colado 200 mm, ensaio de corte simples sem ancoragem mecânica (a) curva tensão de aderência vs. deslizamento (b) curva força vs. deslizamento

Repare-se que os deslocamentos analíticos na extremidade livre ($x = 0$) ao longo do comprimento colado teórica são nulos, conforme esperado dado que o comprimento colado é superior ao efetivo. Ao invés, na extremidade carregada os deslocamentos tomam os valores das abscissas dos pontos A, B, C e D conforme assumidos anteriormente.

Os valores experimentais estão próximos dos valores teóricos, como mostra a Figura 6.6, verificando-se, no entanto, uma melhor aproximação aos pontos A e B (vermelho e laranja, respectivamente). O ponto D é o que gera resultados mais díspares uma vez que esse ponto corresponde ao momento da rotura do ensaio experimental que provoca uma oscilação de valores dos extensômetros.

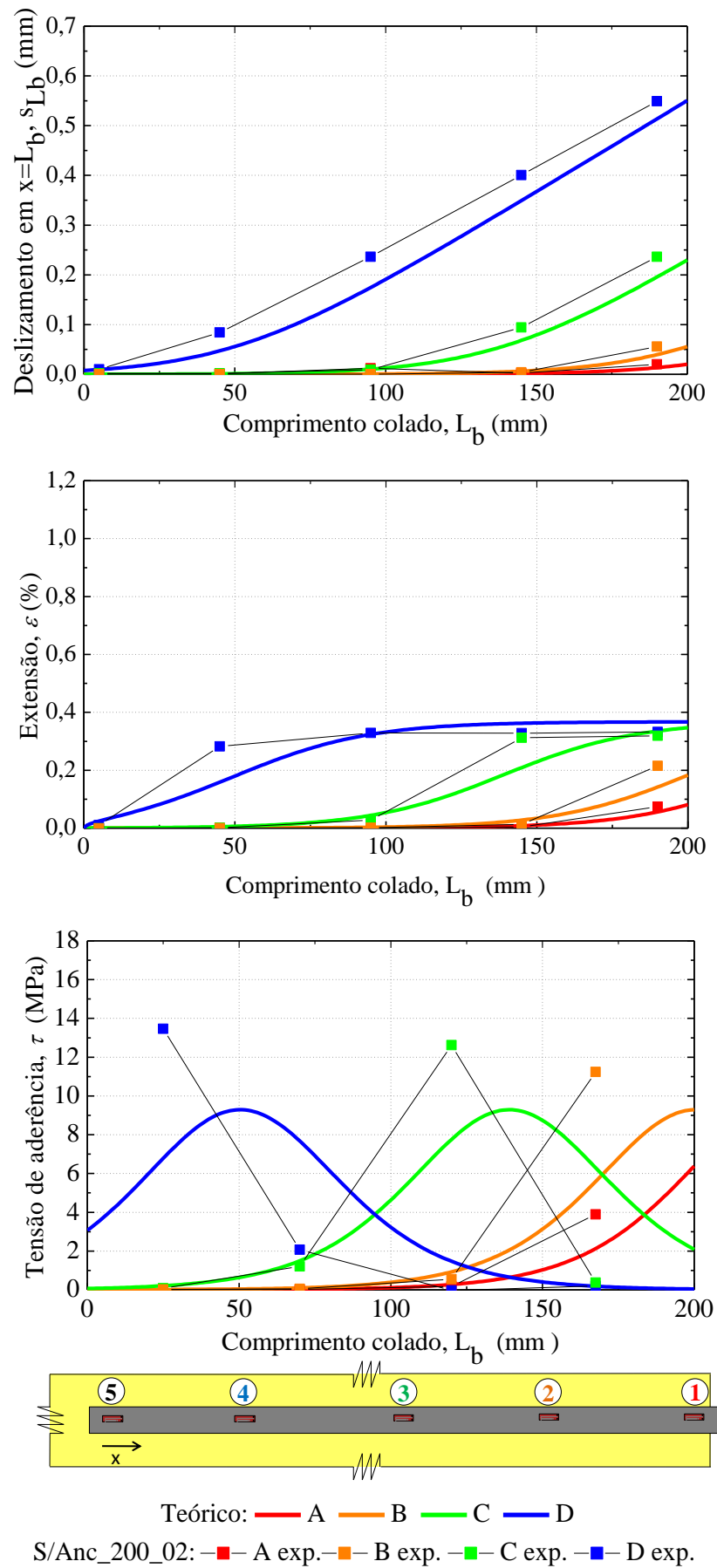


Figura 6.6 – Distribuição de deslocamentos, extensões e tensões e ao longo do comprimento colado de 200 mm

Para a distribuição das extensões ao longo do comprimento colado, Figura 6.6, verifica-se que, os pontos mais próximos do modelo teórico são os pontos A e B. O ponto C tem um valor de extensão menor que o teórico na extremidade carregada ($x=200\text{mm}$) tanto como o ponto D. O mesmo pode-se constatar no gráfico força vs. deslizamento da Figura 6.5, ou seja a força máxima atingida experimentalmente é de 7,2 kN e a teórica é de 8,17 kN.

Por último a distribuição experimental das tensões de aderência ao longo do comprimento colado também verifica uma boa aproximação com a teórica. Apesar dos valores experimentais máximos da tensão de aderência serem variáveis ao longo do comprimento, as curvas teóricas mostram que o valor de tensão de aderência máxima, 9,29 MPa, é sempre respeitado. Torna-se mais difícil aproximar o modelo analítico com os resultados experimentais, neste tipo de gráfico, pois considera-se que a distribuição das tensões de aderência experimentais é constante entre extensómetros, enquanto que no modelo analítico essa distribuição é não linear, conforme mostra a Figura 6.6.

A partir da expressão (3.31) da página 42, determinou-se o andamento da força no substrato ao longo do comprimento colado. Comparando estes resultados analíticos com os pontos obtidos experimentalmente, verifica-se o que em ambos os casos as curvas geradas têm o mesmo andamento. Porém, os valores experimentais são sempre valores superiores no caso dos dois primeiros pontos (A e B) e inferiores para as outras duas curvas (C - verde e D - azul).

A força no substrato máxima atingida para o comprimento colado de 200 mm é 8,19 kN na extremidade livre do provete. Para uma área de contacto de 10 mm x 150 mm de aço a tensão no substrato para essa força máxima é 5,5 MPa. Se a tensão de plastificação do aço for considerada 235 MPa verifica-se que o aço está muito longe de plastificar, portanto a rotura da ligação FRP/aço é sempre pela resina epoxídica.

Note-se que, para comprimentos colados superiores ao efetivo (extensão é nula junto da extremidade livre), a força máxima transmitida ao aço na extremidade livre atinge o valor da força máxima transmitida ao compósito de CFRP na extremidade carregada.

Apresentam-se em seguida as curvas analíticas e experimentais para o comprimento colado de 175 mm. A Figura 6.8 mostra a curva extensão vs. deslizamento, a Figura 6.9 mostra a curva força vs. deslizamento e por fim na Figura 6.10 mostra a curva tensões de aderência vs. deslizamento. Os resultados mostram os dois ensaios realizados com 175 mm de comprimento colado.

As curvas experimentais de extensão vs. deslizamento representadas na Figura 6.8 apresentam inicialmente, um andamento quase linear, e de seguida, tanto a curva experimental como a teórica, tendem para um valor constante de extensão que corresponde à extensão máxima da ligação CFRP/aço. Para o comprimento colado de 175 mm, a extensão máxima, no ensaio S/Anc_Lb175_01, foi de 0,38 % e no ensaio S/Anc_Lb175_02 de 0,34 %, sendo valor obtido a partir do modelo analítico 0,37%.

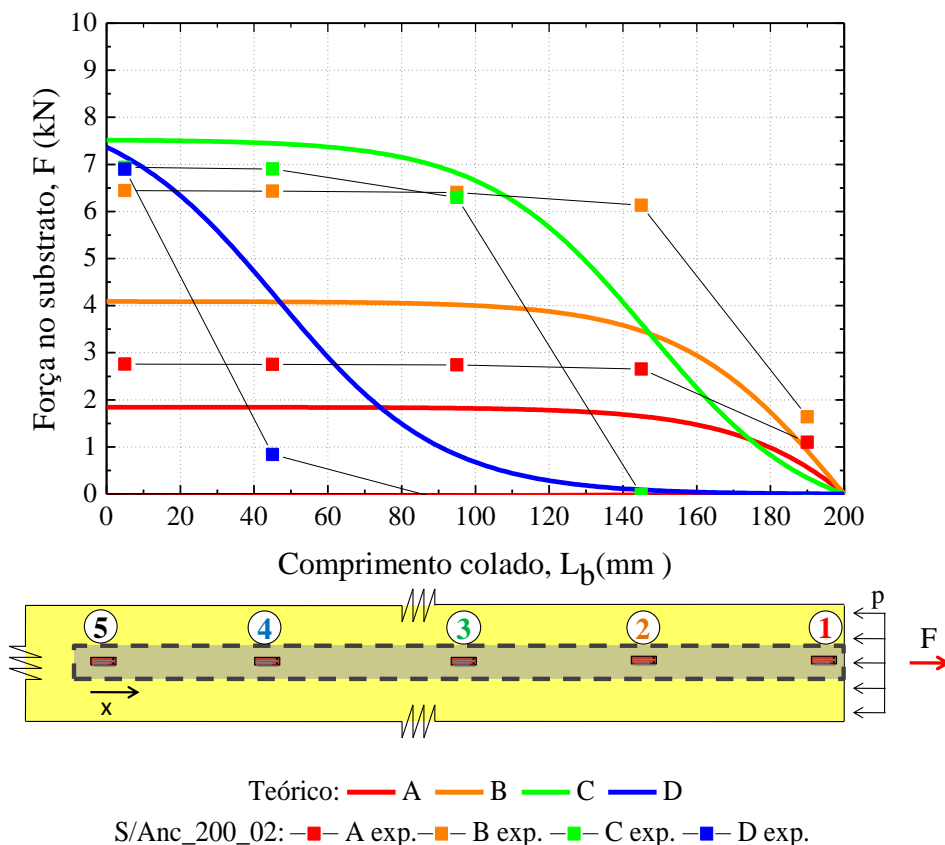


Figura 6.7 – Força no substrato ao longo do comprimento colado de 200 mm

Em ambos os ensaios, as curvas teóricas estão bastante próximas da curva experimentais, porém o ensaio S/Anc_Lb175_01 ainda se aproxima mais da teórica do que o ensaio S/Anc_Lb175_02. Quando o deslizamento é 0,35 mm, o erro entre a curva extensão vs. deslizamento experimental e a curva extensão vs. deslizamento analítica é de 3,15% para o ensaio S/Anc_Lb175_01, ou seja, o modelo analítica aproxima-se bem do modelo experimental. No entanto, para o ensaio S/Anc_Lb175_02 o erro é superior, é de 9,21%, (deslizamento de 0,42 mm) neste ensaio o modelo analítico está menos próximo do experimental que o ensaio S/Anc_Lb175_01.

A Figura 6.9 mostra que o ensaio S/Anc_Lb175_02 não é bem aproximado pelo modelo analítico, pois o erro, quando o deslizamento é 0,42 mm, é de 21,5%. No entanto, o ensaio S/Anc_Lb175_01 tem o mesmo andamento que o analítico e o erro, quando o deslizamento é 0,33 mm, é 0,80%.

Porém o mesmo não se verifica nas curvas correspondentes às tensões de aderência vs. deslizamento da Figura 6.10. Quando o s_{max} é atingido pela curva *bond-slip* média o ensaio experimental S/Anc_Lb175_01 ainda aumenta os valores de tensão de aderência para 15,5 MPa o que leva a um erro de 67%. Após este pico a curva *bond-slip* média tem um andamento não linear amolecido e o andamento do ensaio S/Anc_Lb175_01 é mais linear. No ensaio S/Anc_Lb175_02 o mesmo acontece, só que agora com um erro menor de 50,8%. Neste ensaio, nem o andamento inicial não linear está aproximado do experimental.

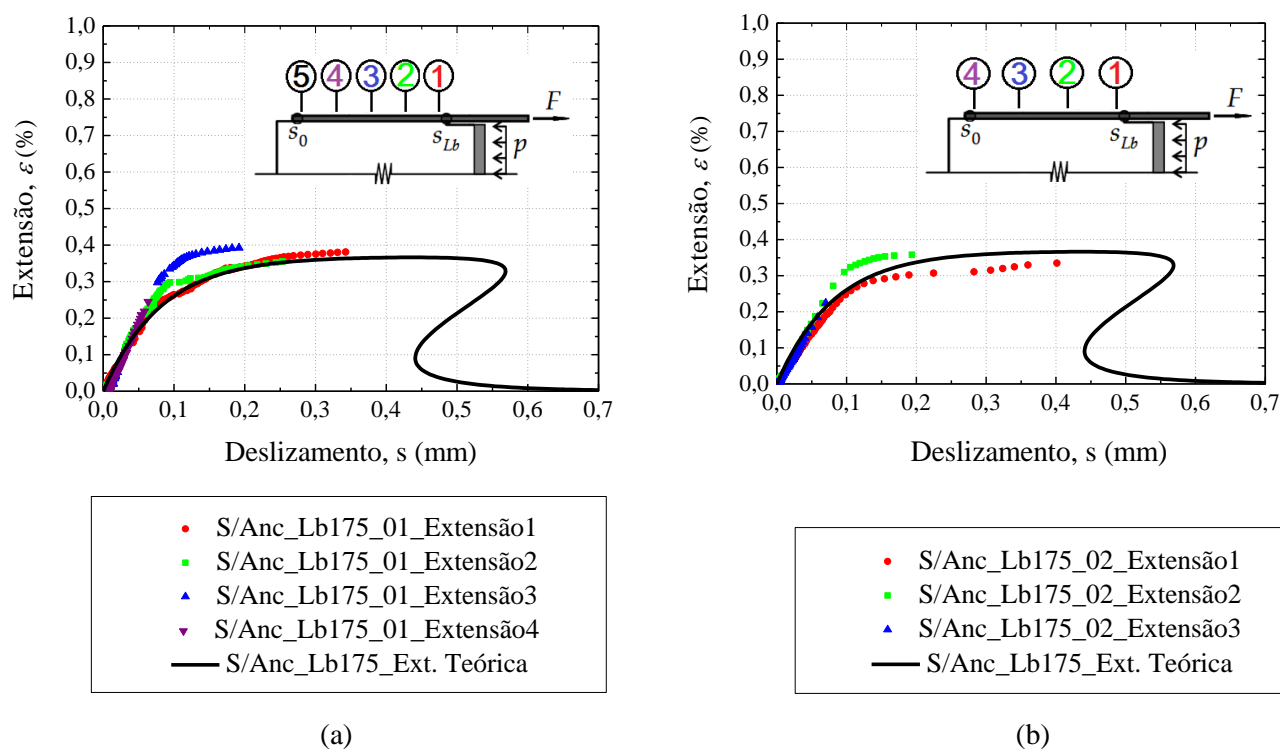


Figura 6.8 - Curvas teórica e experimental extensão vs. deslizamento para o ensaio de corte simples sem ancoragem mecânica (a) S/Anc_Lb175_01 (b) S/Anc_Lb175_01

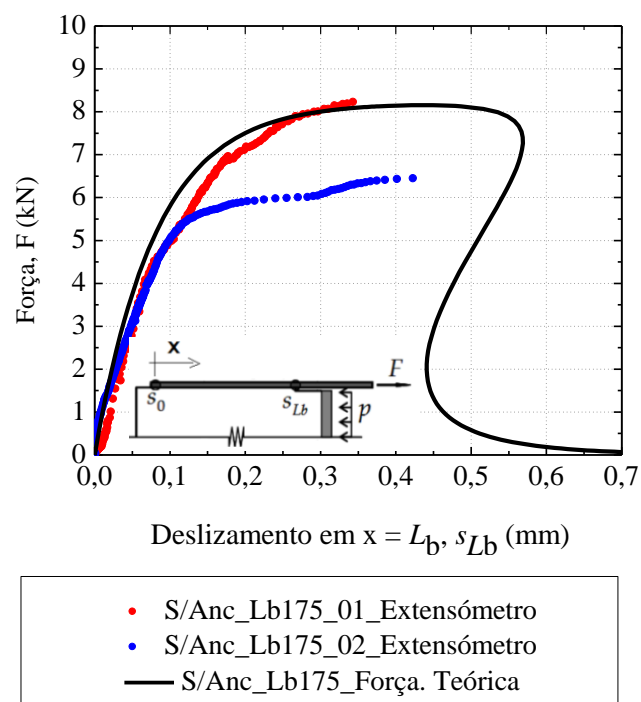
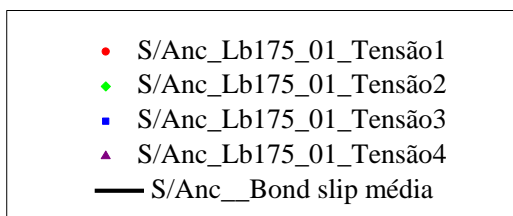
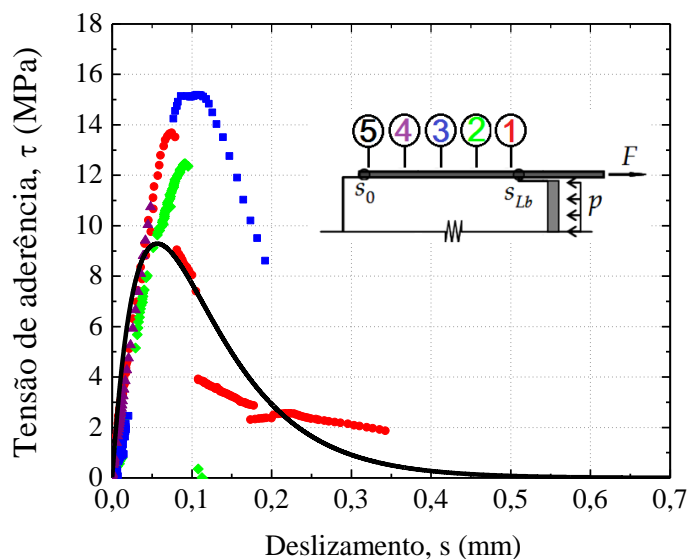
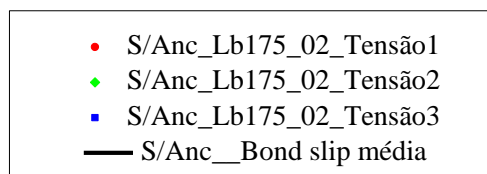
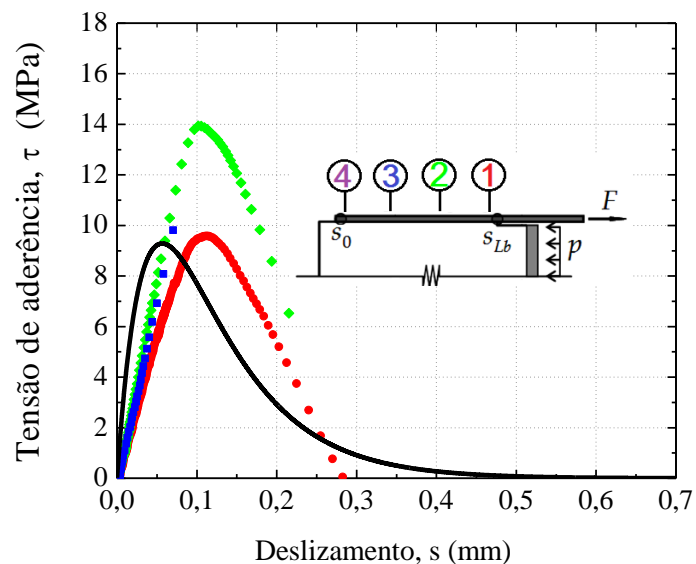


Figura 6.9 - Curva força vs. deslizamento teórica e experimental para ensaio de corte simples sem ancoragem mecânica para comprimento colado de 175mm



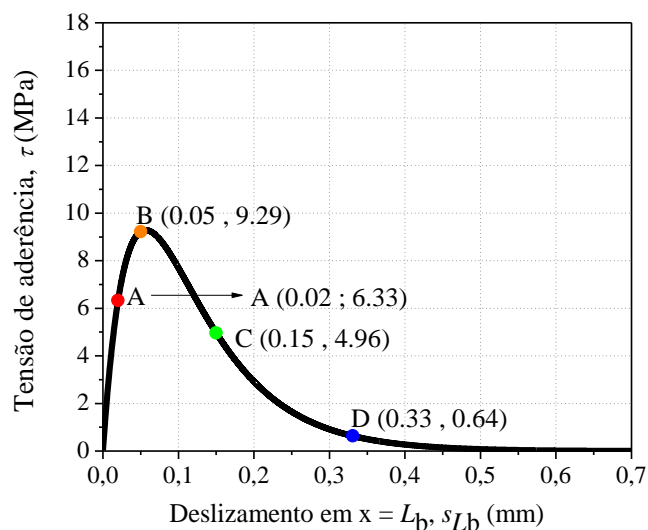
(a)



(b)

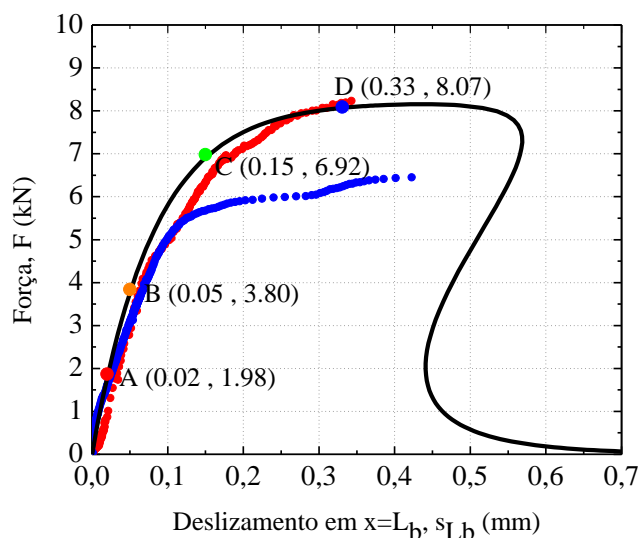
Figura 6.10 - Curvas de tensão de aderência vs. deslizamento teórica e experimentais (a) S/Anc_Lb175_01
(b) S/Anc_Lb175_01

A mesma análise anteriormente feita para o comprimento colado de 200 mm foi seguida novamente nos ensaios com comprimento colado de 175 mm, i.e., encontraram-se quatro pontos da curva *bond-slip* média com deslizamentos diferentes, como se verifica na Figura 6.11.



— Lei de bond slip média

(a)



• S/Anc_Lb175_01_Extensômetro
• S/Anc_Lb175_02_Extensômetro
— S/Anc_Lb175_Força. Teórica

(b)

Figura 6.11 - Comprimento colado 175 mm, ensaio de corte simples sem ancoragem mecânica (a) curva tensão de aderência vs. deslocamento (b) curva força vs. deslocamento

A Figura 6.12 mostra as distribuições dos deslocamentos, das extensões e das tensões de aderência ao longo do comprimento colado. Os resultados mostram que as curvas analíticas estão bastante próximas das curvas experimentais dos ensaios S/Anc_Lb175_01 e S/Anc_Lb175_02 excepto o ponto D correspondente ao ensaio S/Anc_Lb175_01.

A menor aproximação das curvas experimentais tensões de aderência ao longo do comprimento colado com as curvas analíticas deve-se, ao já explicado anteriormente, em que a tensão de aderência na distância entre extensômetros foi considerada constante e analiticamente isso não acontece.

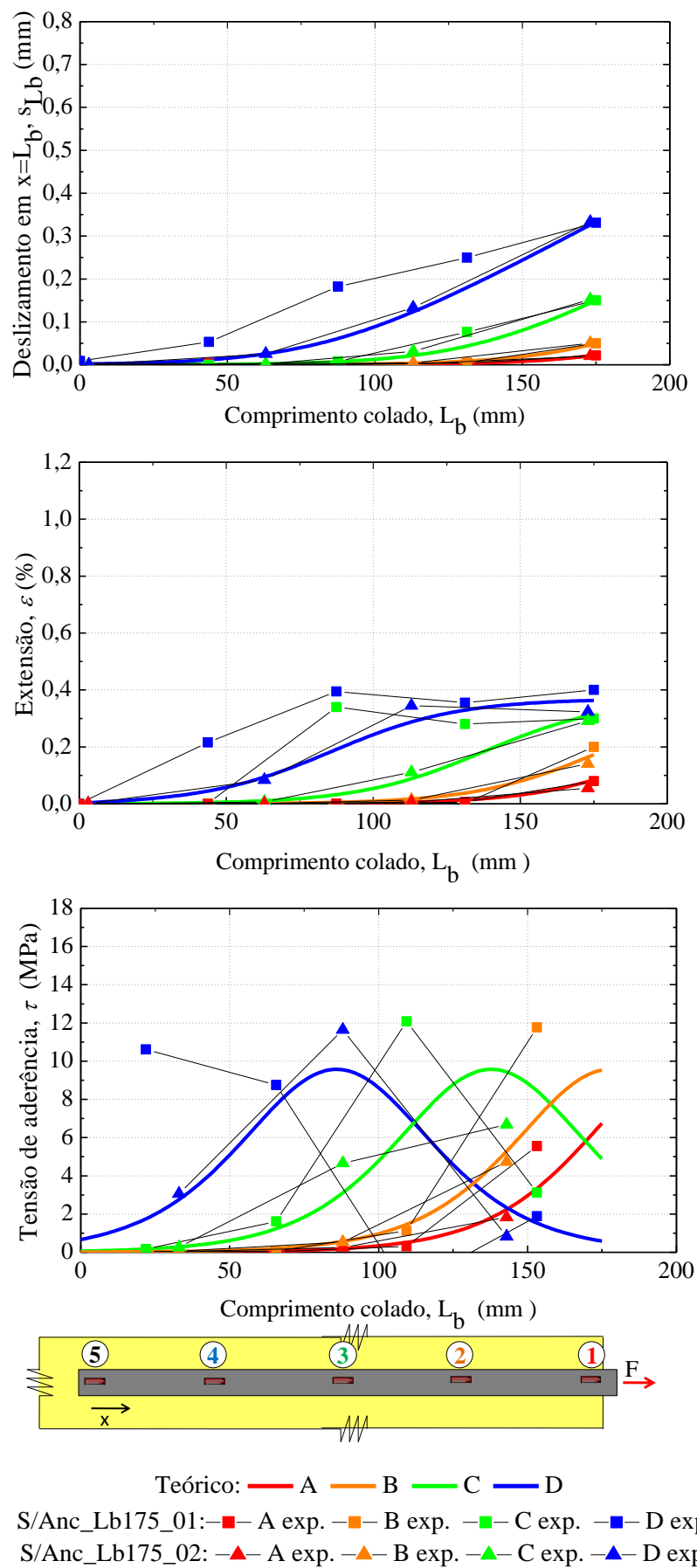


Figura 6.12 - Distribuição de deslocamentos, extensões e tensões ao longo do comprimento colado de 175 m

A Figura 6.13 a) mostra o ensaio S/Anc_Lb150_01 e nota-se que a curva analítica está afastada das curvas experimentais extensão vs. deslizamento. Quando o deslizamento é 0,46 mm, o erro obtido entre as curvas é 11,5% do ensaio S/Anc_Lb150_01. No entanto, o ensaio S/Anc_Lb150_02 tem um erro inferior de 30,7% quando o deslizamento é 0,52 mm.

Ambos os ensaios têm, inicialmente, um troço quase linear com uma inclinação superior à da curva analítica. No ponto 0,1 mm o erro é muito superior aos referidos anteriormente, para o ensaio S/Anc_Lb150_01 o erro é de 22,0% e no ensaio S/Anc_Lb150_02 o erro é 22,1%.

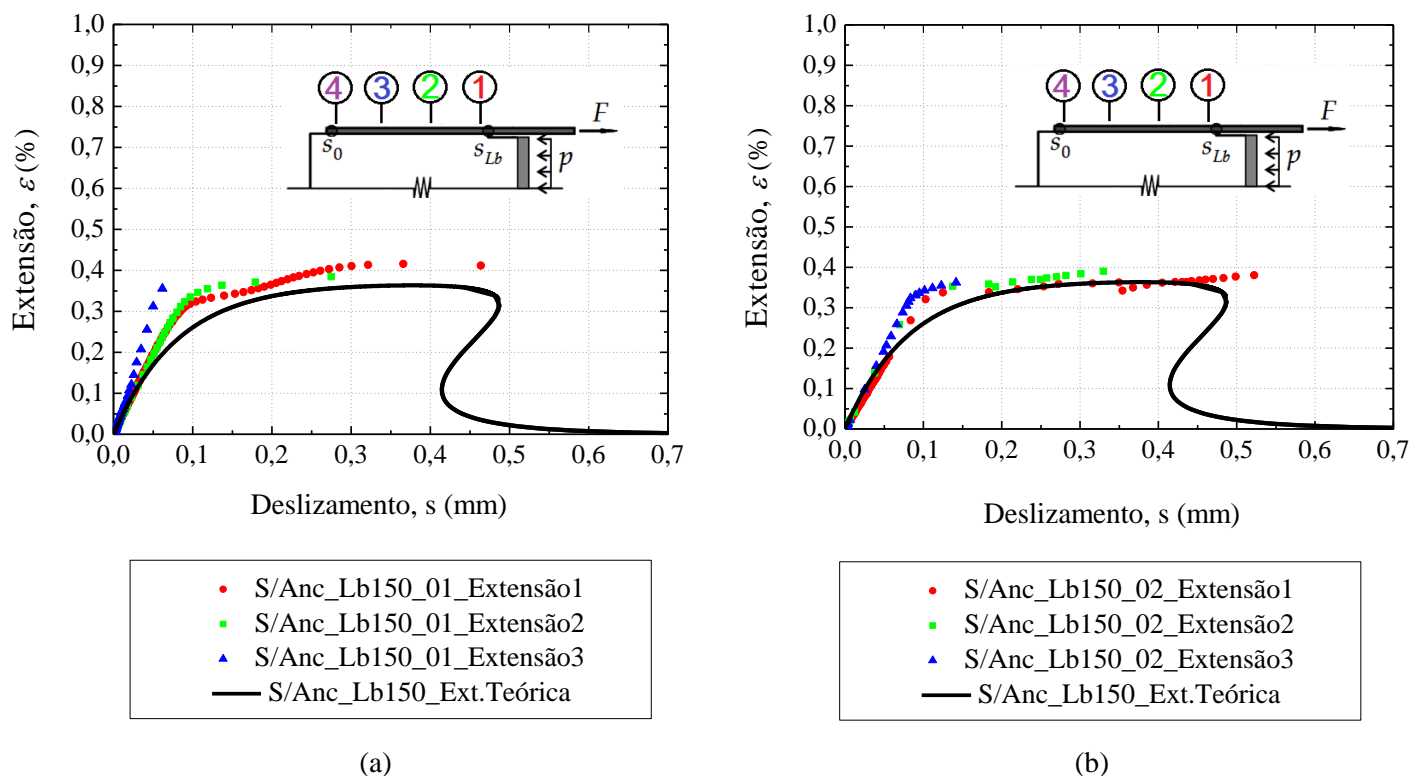


Figura 6.13 – Curvas extensão vs. deslizamento teórica e experimental para ensaio de corte simples sem ancoragem mecânica (a) comprimento colado 150 mm 1º ensaio (b) comprimento colado 150 mm 2º ensaio

O mesmo se verifica para as curvas analíticas e experimentais relativas a força vs. deslizamento, mostradas na Figura 6.14. Experimentalmente a força é incrementada e, por isso, não é possível estudar o fenómeno *snap-back*.

No ensaio S/Anc_Lb150_01 da Figura 6.15a) a curva *bond-slip* média não tem uma boa aproximação com as curvas experimentais, estas têm um erro de 40,0% para o pico. E o ensaio S/Anc_Lb150_02 da Figura 6.15b) tem um erro de 38,1% também para o pico.

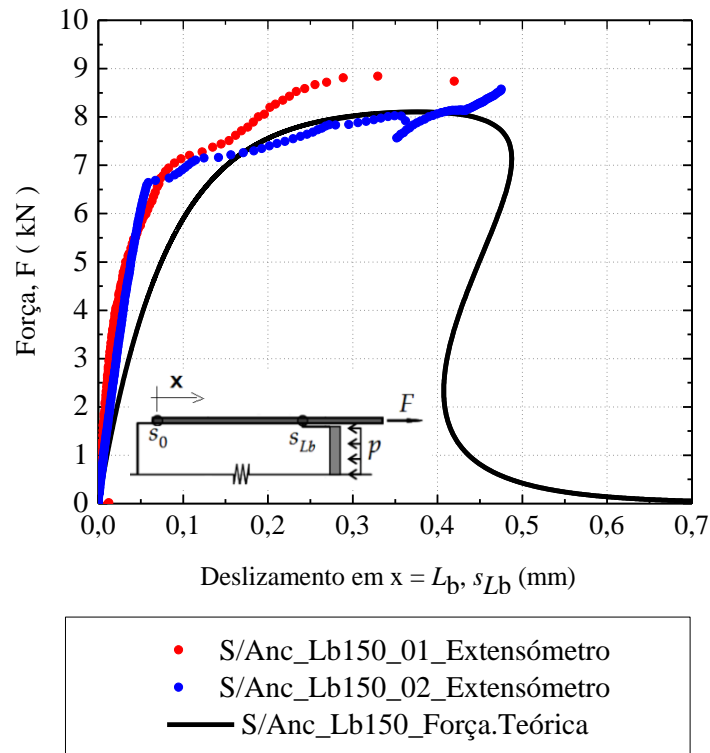
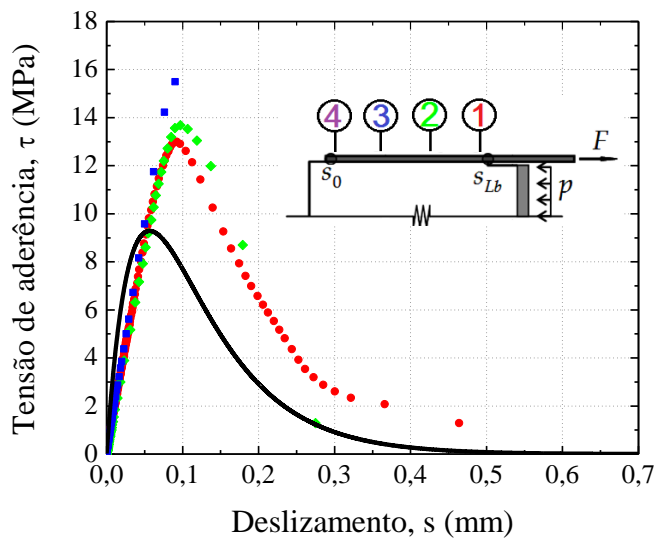
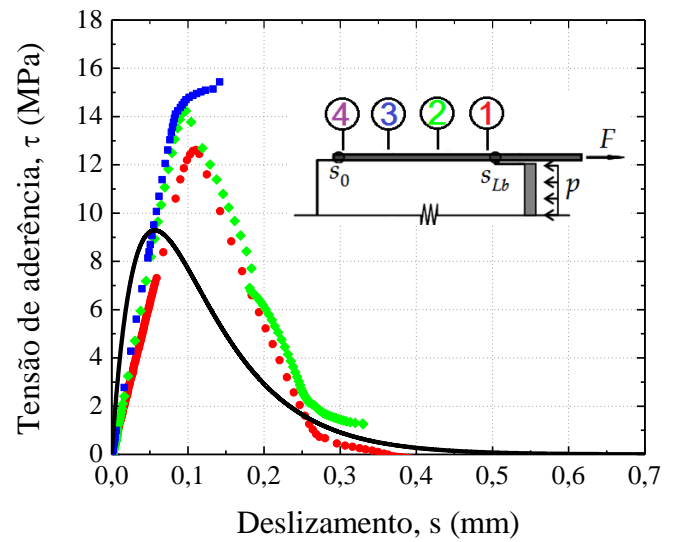


Figura 6.14 – Curva teórica e experimental força vs. deslizamento para o ensaio de corte simples sem ancoragem mecânica com comprimento colado de 150mm.



(a)



(b)

Figura 6.15 – Curvas de tensão de aderência vs. deslizamento teórica e experimentais (a) S/Anc_Lb150_01
(b) S/Anc_Lb150_02

A Figura 6.16 mostra os pontos analisados para estudar as distribuições dos deslizamentos, das extensões e das tensões de aderência ao longo do comprimento colado da Figura 6.17. Os resultados mostram que as curvas analíticas estão bastante próximas das curvas experimentais dos ensaios S/Anc_Lb150_01 e S/Anc_Lb150_02, excepto as curvas das tensões de aderência ao longo do comprimento, aqui a diferença do modelo analítico é considerável. A justificação desta diferença já foi referida anteriormente.

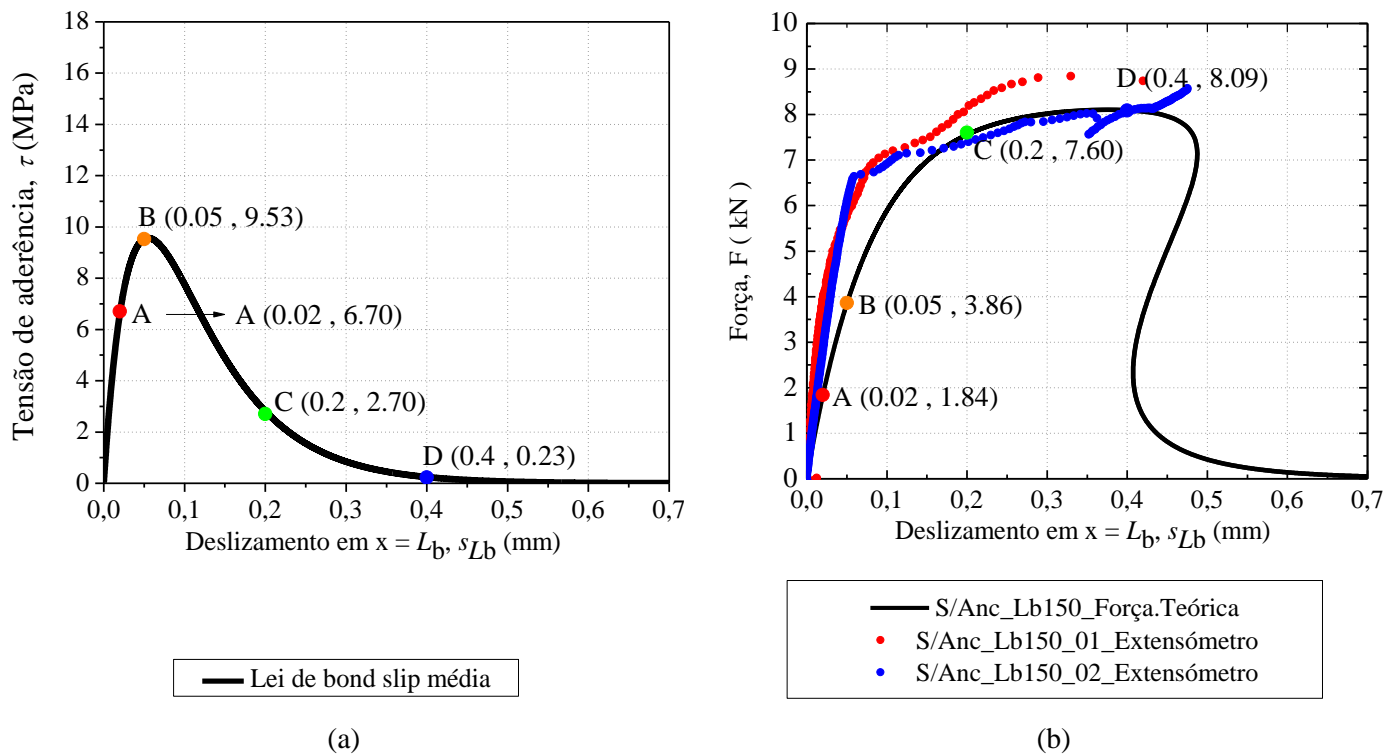


Figura 6.16 - Comprimento colado 150 mm, ensaio de corte simples sem ancoragem mecânica (a) curva tensão de aderência vs. deslocamento (b) curva força vs. deslocamento

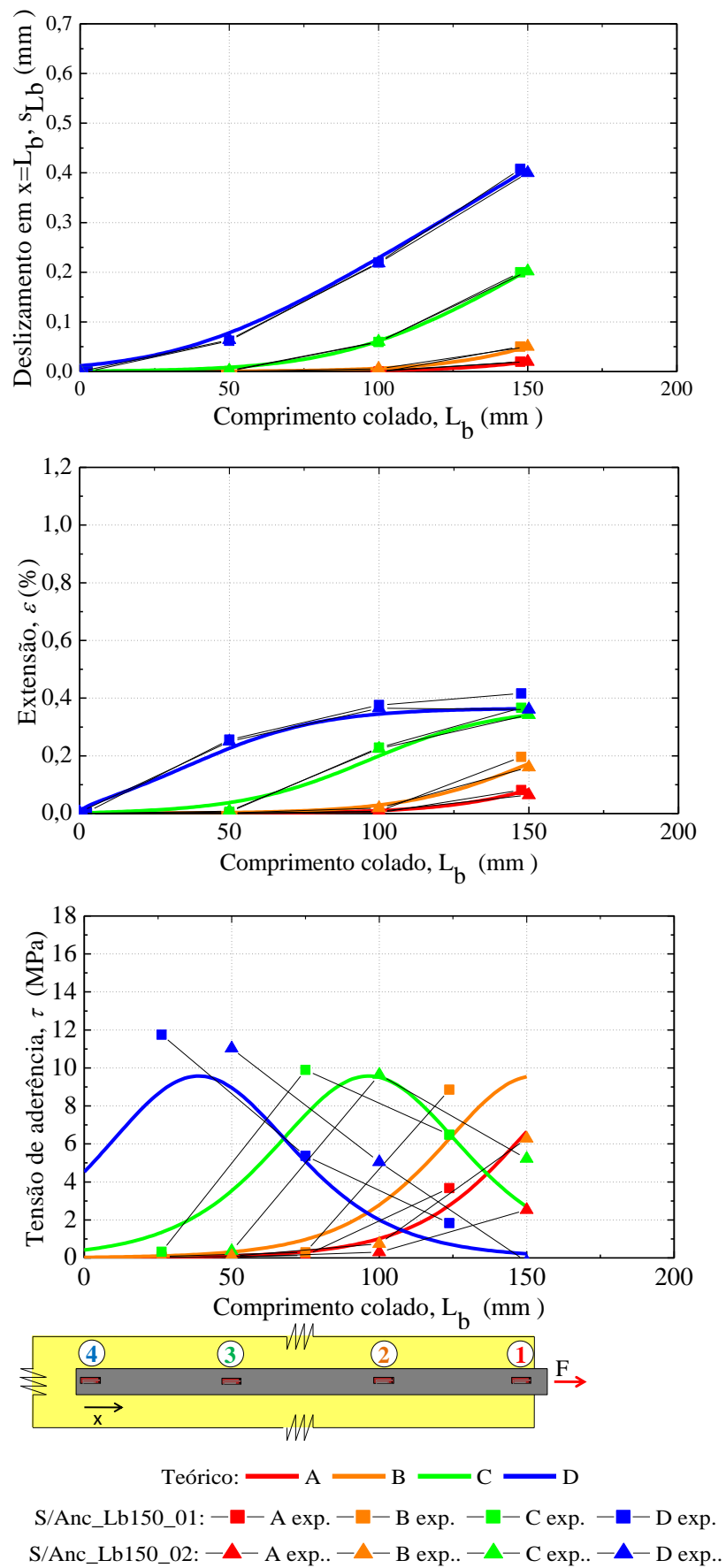


Figura 6.17 - Distribuição de deslizamentos, extensões e tensões ao longo do comprimento colado de 150 mm

6.1.3. Comprimento colado inferior ao comprimento efetivo

As curvas de extensão vs. deslizamento, força vs deslizamento e tensão vs. deslizamento foram obtidas para os três comprimentos colados inferiores ao comprimento efetivo, i.e., comprimento colado de 1000 mm (S/Anc_Lb100_01 e S/Anc_Lb100_02), comprimento colado de 75 mm (S/Anc_Lb75_01 e S/Anc_Lb75_02) e comprimento colado de 50 mm (S/Anc_Lb50_01, S/Anc_Lb50_02 e S/Anc_Lb50_03).

As curvas experimentais de extensão vs. deslizamento representadas na Figura 6.18, inicialmente, aumentaram de forma não linear e de seguida tendem para um valor constante de extensão, valor de extensão máxima da ligação CFRP com o aço com comprimento colado de 100 mm.

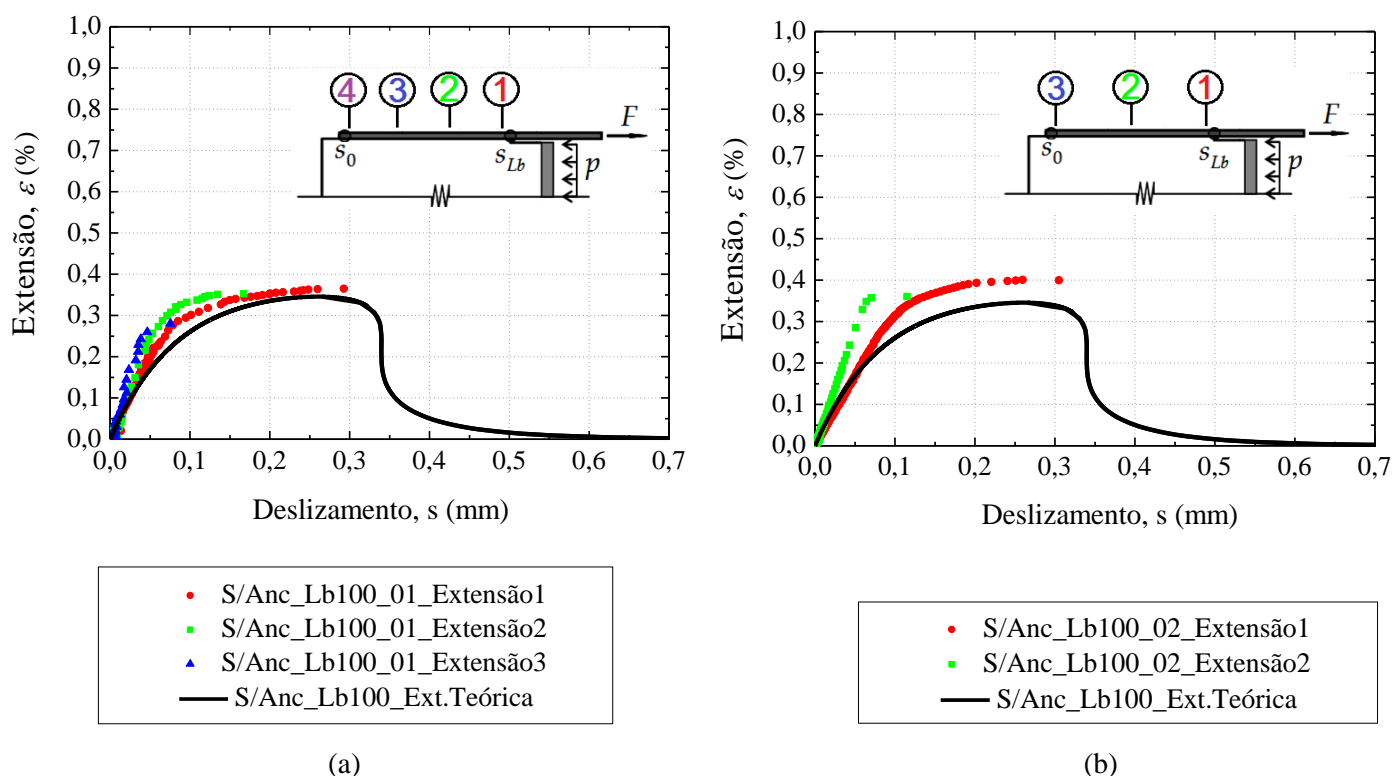


Figura 6.18 - Curvas extensão vs. deslizamento teórica e experimentais para ensaio de corte simples sem ancoragem mecânica (a) comprimento colado 100 mm 1º ensaio (b) comprimento colado 100 mm 2º ensaio

Verifica-se que a curva extensão vs. deslizamento analítica da Figura 6.18 a) está mais próxima das curvas experimentais do que a curva extensão vs. deslizamento analítica da Figura 6.18 b). Portanto o erro do ensaio S/Anc_Lb100_02, quando o deslizamento é 0,31 mm, é 20,9% valor superior ao erro do ensaio S/Anc_Lb100_01, quando o deslizamento é 0,29 mm que é de 10,5%.

Na Figura 6.19 verifica-se o mesmo que foi referido para a curva extensão vs. deslizamento, o ensaio S/Anc_Lb100_02 está mais afastado do que o ensaio S/Anc_Lb100_01.

Porém, inicialmente, o ensaio S/Anc_Lb100_01 é o que está mais afastado da curva analítica com um erro de 55,6% e cujo deslizamento é 0,06 mm. Enquanto que o ensaio S/Anc_Lb100_02 tem um erro bastante inferior de 10,2%.

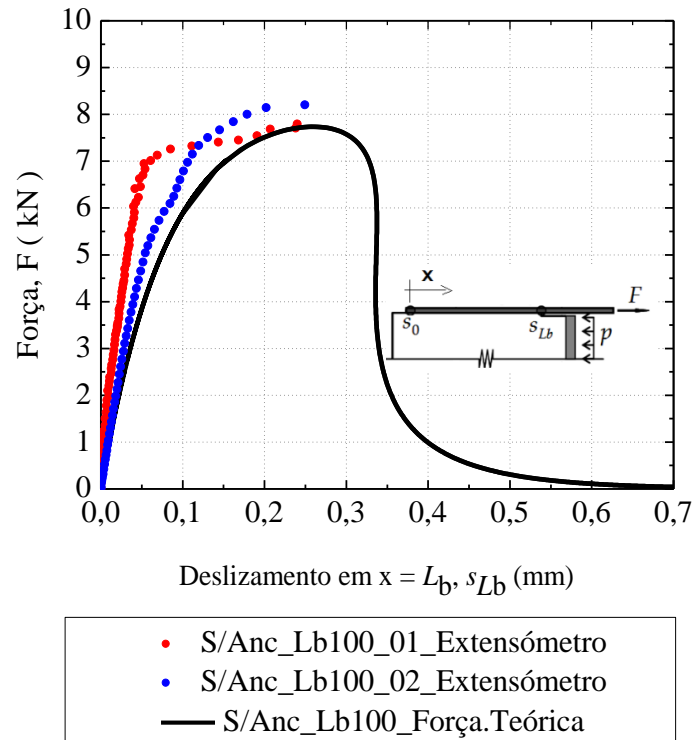
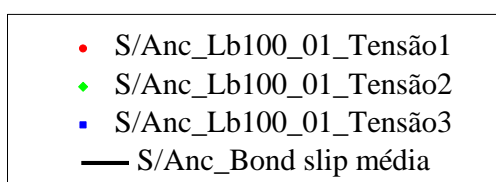
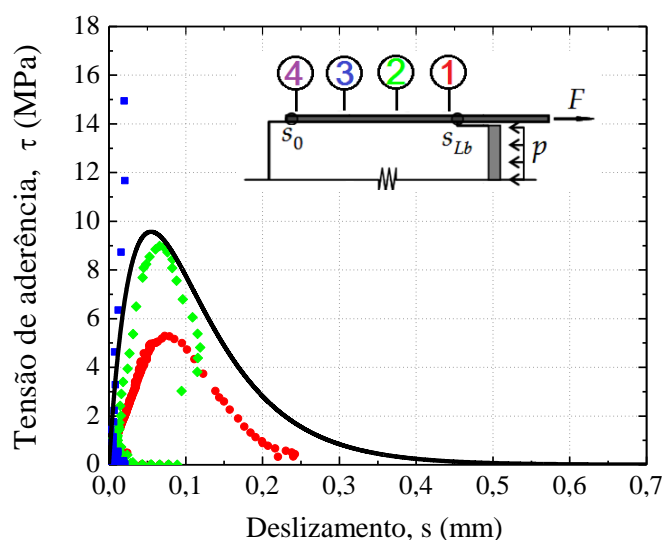


Figura 6.19 - Curva força vs. deslizamento teórica e experimental para ensaio de corte simples sem ancoragem mecânica para comprimento colado de 100mm

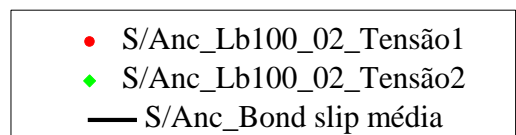
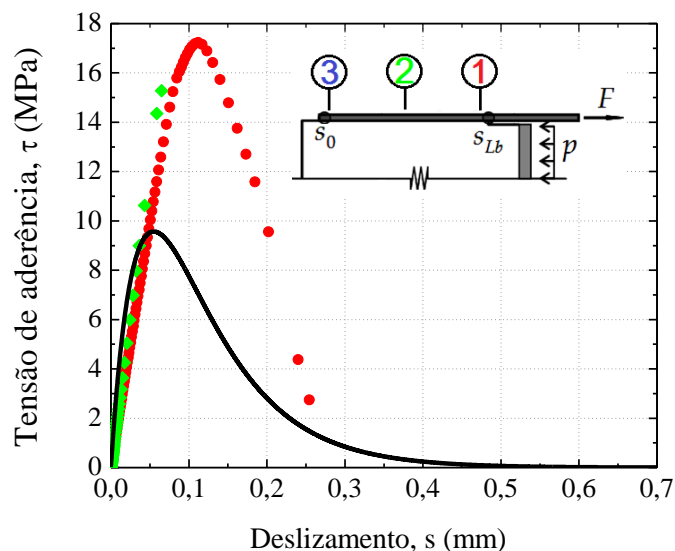
As Figura 6.20 (a) e Figura 6.20 (b) mostram uma grande diferença entre si, relativamente às tensões de aderência vs. deslizamento experimentais. Para além dos ensaios terem quantidades diferentes de extensômetros, os valores de pico dos ensaios tem uma grande discrepância entre eles e estas diferenças só acontecem na curva tensão de aderência vs. deslizamento.

No ensaio S/Anc_Lb100_01 o erro entre a curva analítica e a experimental da extremidade carregada é 42,9% e no ensaio S/Anc_Lb100_02 o erro é bastante superior ao anterior com um valor de 85,7%. Esta discrepância da curva *bond-slip* média com as curvas experimentais influencia a qualidade do modelo analítico na aproximação das restantes curvas extensão vs. deslizamento e força vs. deslizamento, conforme se verifica na Figura 6.18.

A mesma análise de distribuição de deslocamentos, extensões e tensões de aderência ao longo do comprimento colado, realizada em todos os ensaios anteriormente descritos é agora analisada para o comprimento colado de 100 mm (veja-se a Figura 6.22). Para isso mostram-se os pontos analisados nessa distribuição a partir da curva *bond-slip* média e da curva força vs. deslizamento, conforme a Figura 6.21 indica.



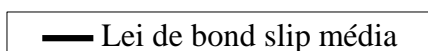
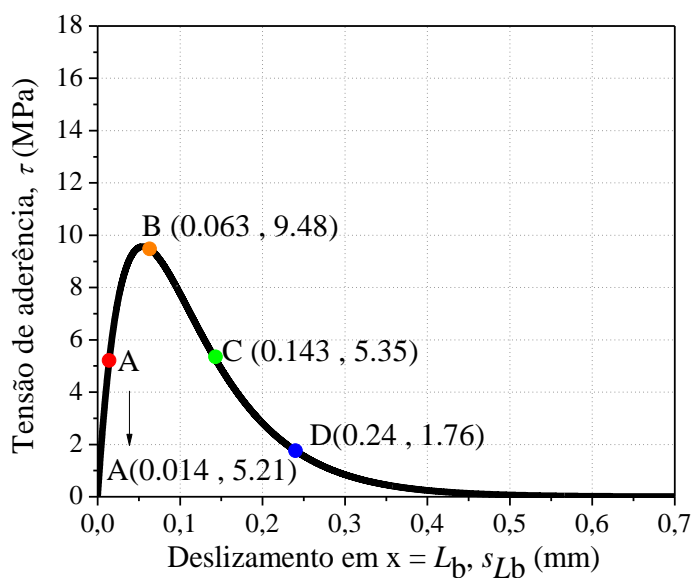
(a)



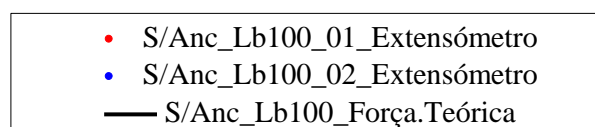
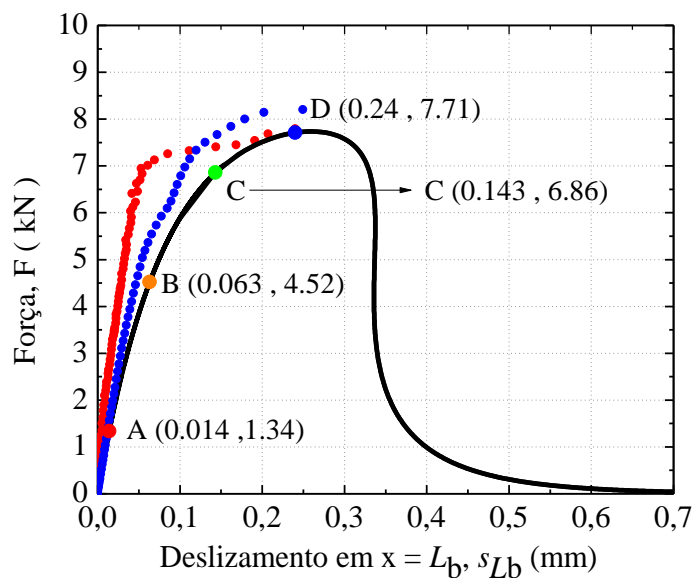
(b)

Figura 6.20 - Curvas de tensão de aderência vs. deslizamento teórica e experimentais (a) S/Anc_Lb100_01

(b) S/Anc_Lb100_02



(a)



(b)

Figura 6.21 - Ensaio de corte simples sem ancoragem mecânica comprimento colado 100 mm, (a) curva tensão de aderência vs. deslizamento (b) curva força vs. deslizamento

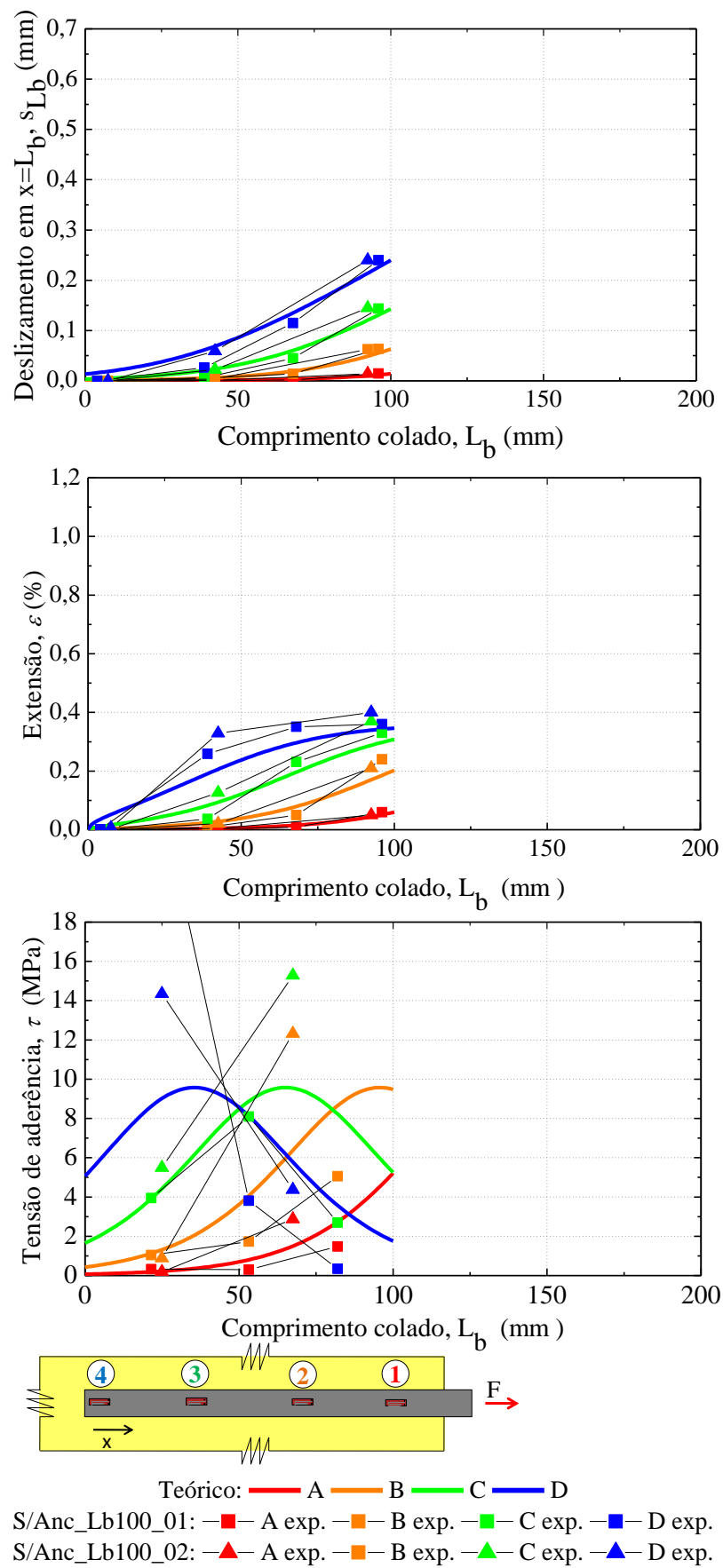


Figura 6.22 - Distribuição de deslocamentos, extensões e tensões e ao longo do comprimento colado de 100 mm

A Figura 6.23 mostra as curvas extensão vs. deslizamento para os dois ensaios realizados (S/Anc_Lb75_01 e S/Anc_Lb75_02) com comprimento colado de 75 mm, juntamente com a curva analítica para esse mesmo comprimento colado. Quando o deslizamento é 0,13 mm, o ensaio S/Anc_Lb75_01 tem um erro de 22,4% entre o valor das extensões. No entanto o ensaio S/Anc_Lb75_02 tem um erro menor, como se pode ver na Figura 6.23b), cujo valor é 3,47% para um deslizamento de 0,19 mm. A curva analítica aproxima-se muito mais do ensaio S/Anc_Lb75_02 do que do ensaio S/Anc_Lb75_01, apesar de ambos inicialmente estarem muito próximos da curva analítica.

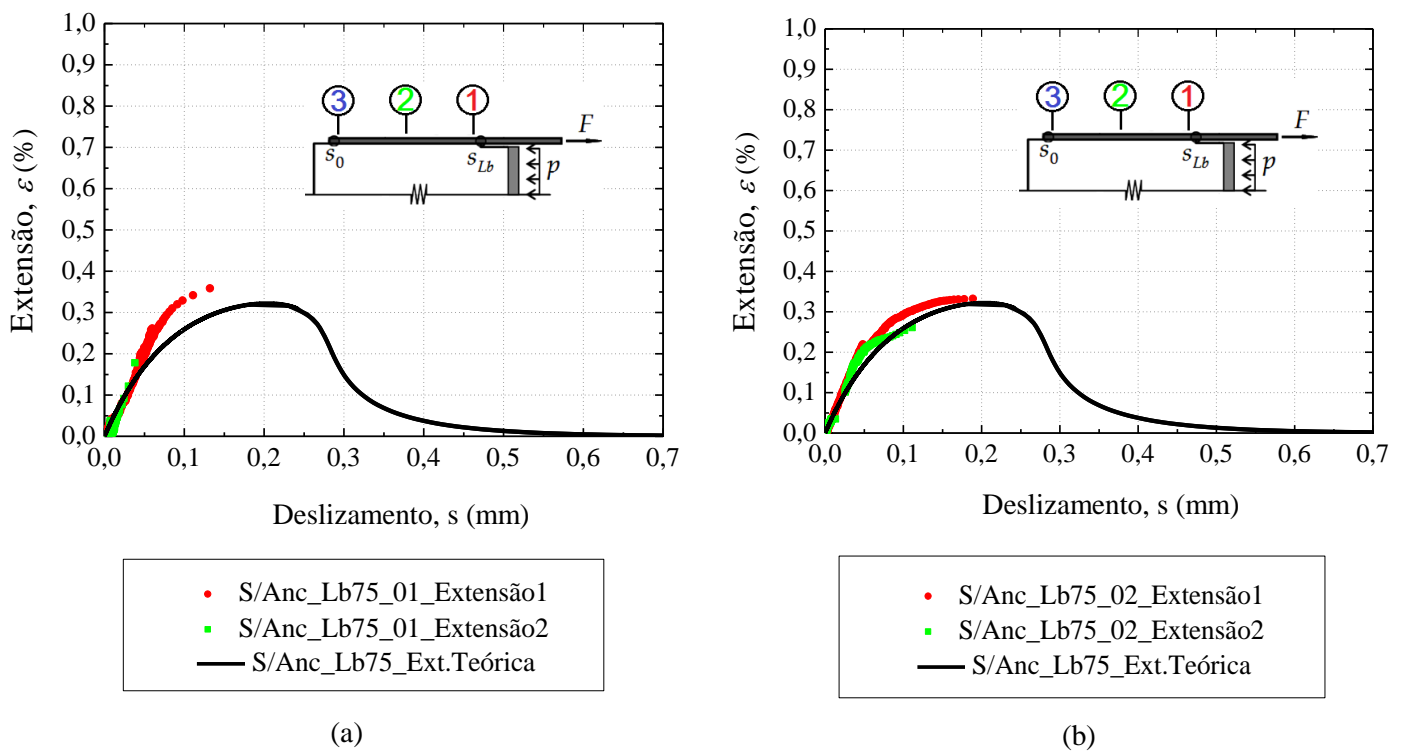


Figura 6.23 - Curvas extensão vs. deslizamento teórica e experimentais para ensaio de corte simples sem ancoragem mecânica (a) S/Anc_Lb75_01 (b) S/Anc_Lb75_02

A curva força vs. deslizamento da Figura 6.24 mostra uma discrepância maior da curva analítica em relação aos ensaios experimentais, com valores de erro superiores a 20,0% em vários pontos de deslizamento. Relativamente a tensão de aderência vs. deslizamento essa discrepância entre o modelo analítico e os ensaios experimentais ainda se tornam mais significativas. Para ambos os ensaios (S/Anc_Lb75_01 e S/Anc_Lb75_012) o erro, para o valor de pico, é 67,1%. No entanto, ambos, inicialmente, i.e., no ramo não linear estão bastante próximos da curva analítica apresentada.

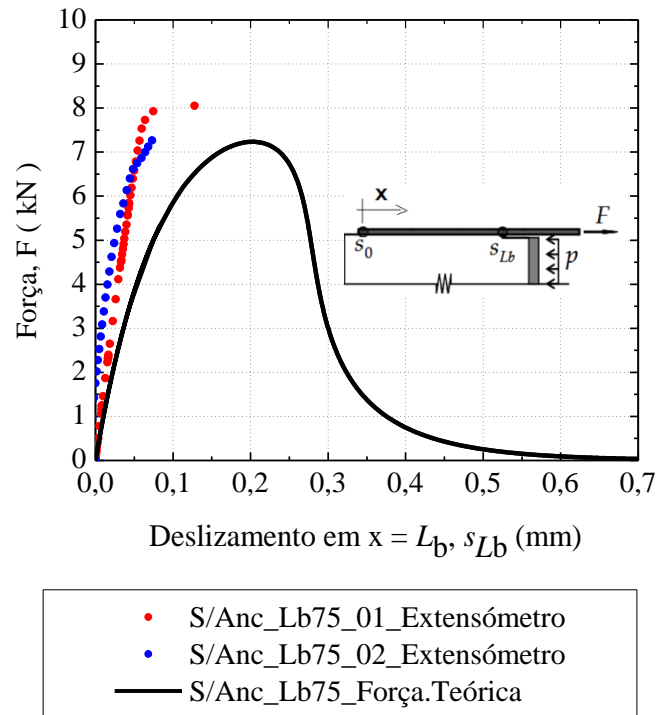


Figura 6.24 - Curva força vs. deslocamento teórica e experimental para ensaio de corte simples sem ancoragem mecânica para comprimento colado de 75 mm

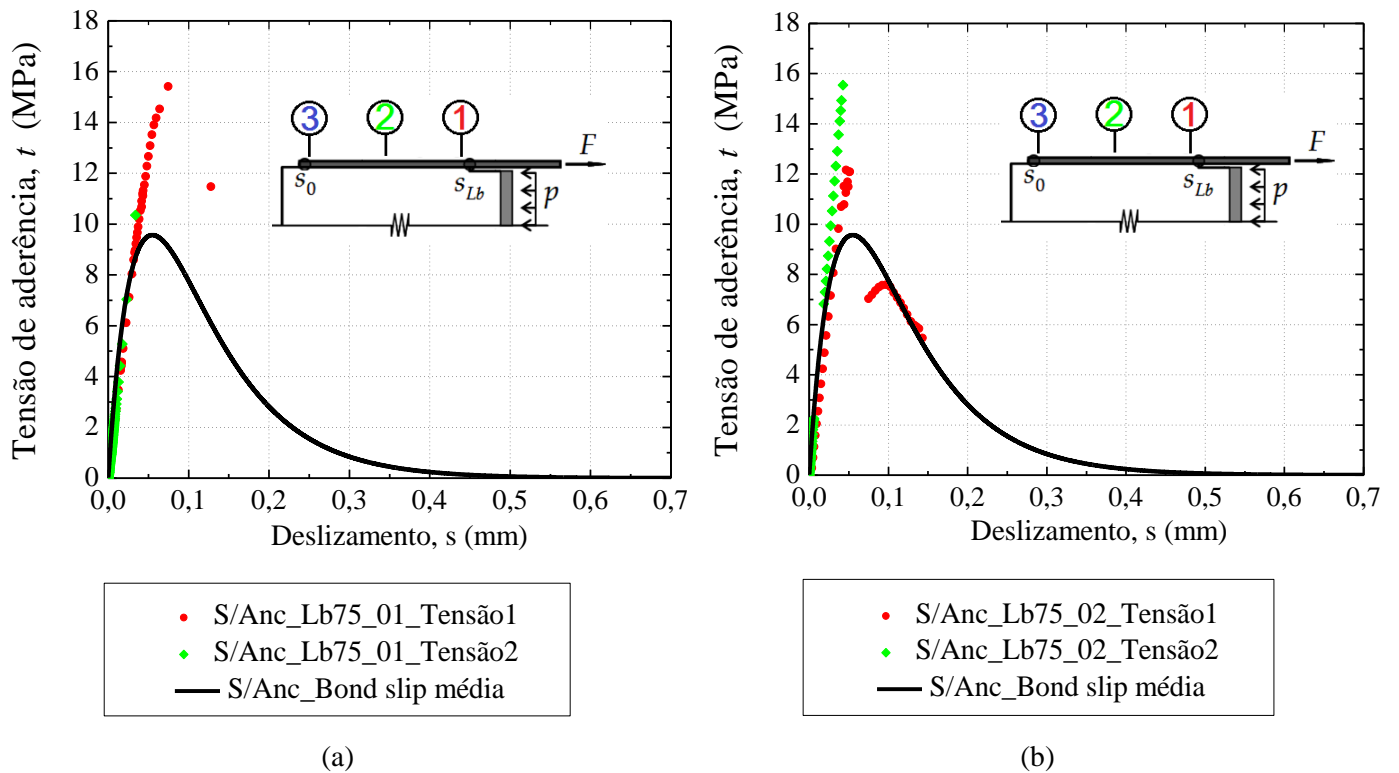


Figura 6.25 - Curvas de tensão de aderência vs. deslocamento teórica e experimentais (a) S/Anc_Lb75_01
(b) S/Anc_Lb75_02

A mesma análise realizada dos outros ensaios sobre a distribuição de deslizamentos, extensões e tensões de aderência ao longo do comprimento colado é agora analisada para o comprimento colado de 75 mm (veja-se a Figura 6.27). Para isso mostram-se os pontos analisados nessa distribuição a partir da curva *bond-slip* média e da curva força vs. deslizamento, conforme a Figura 6.26 indica.

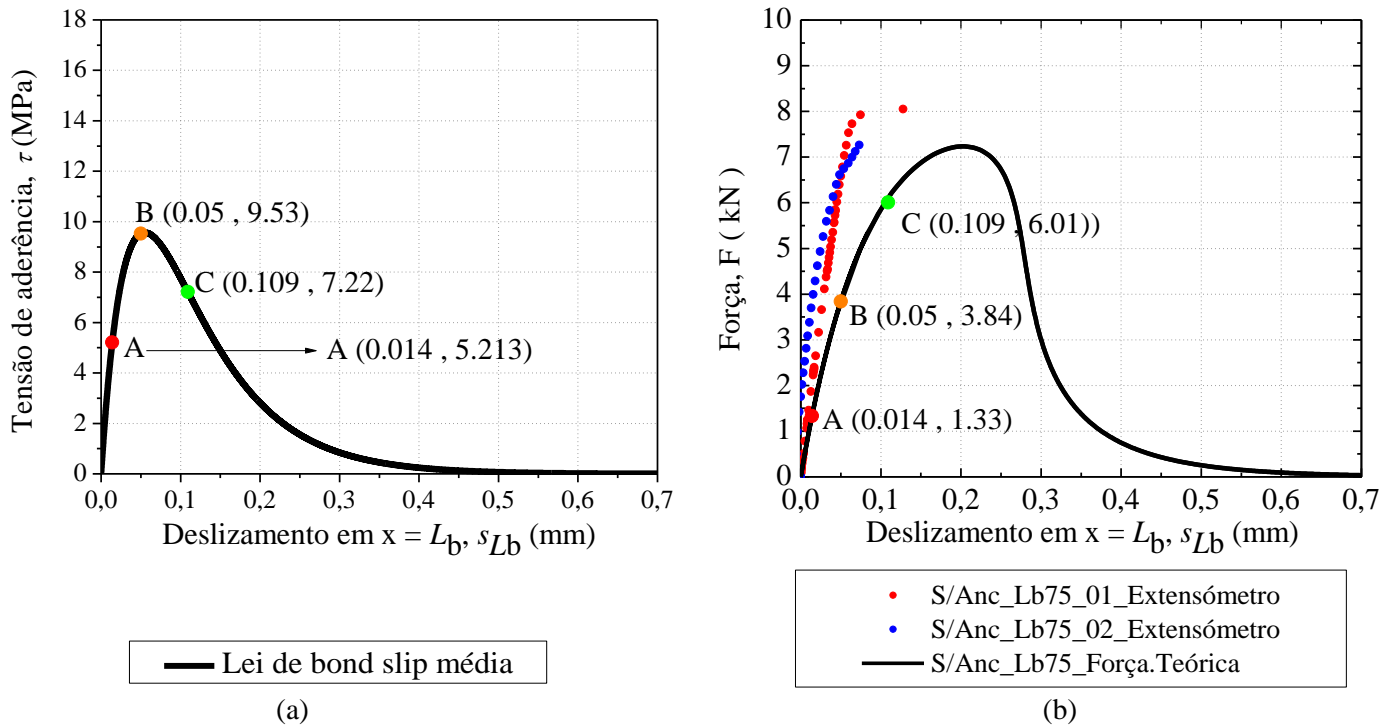


Figura 6.26 - Ensaio de corte simples sem ancoragem mecânica comprimento colado 75 mm, (a) curva tensão de aderência vs. deslizamento (b) curva força vs. deslizamento

Até para comprimentos colados muito curtos o modelo analítico é relativamente próximo dos valores retidos dos ensaios experimentais (S/Anc_Lb75_01 e S/Anc_Lb75_02), conforme a Figura 6.27 mostra. Porém a distribuição das tensões de aderência ao longo do comprimento colado continua afastada do modelo analítico.

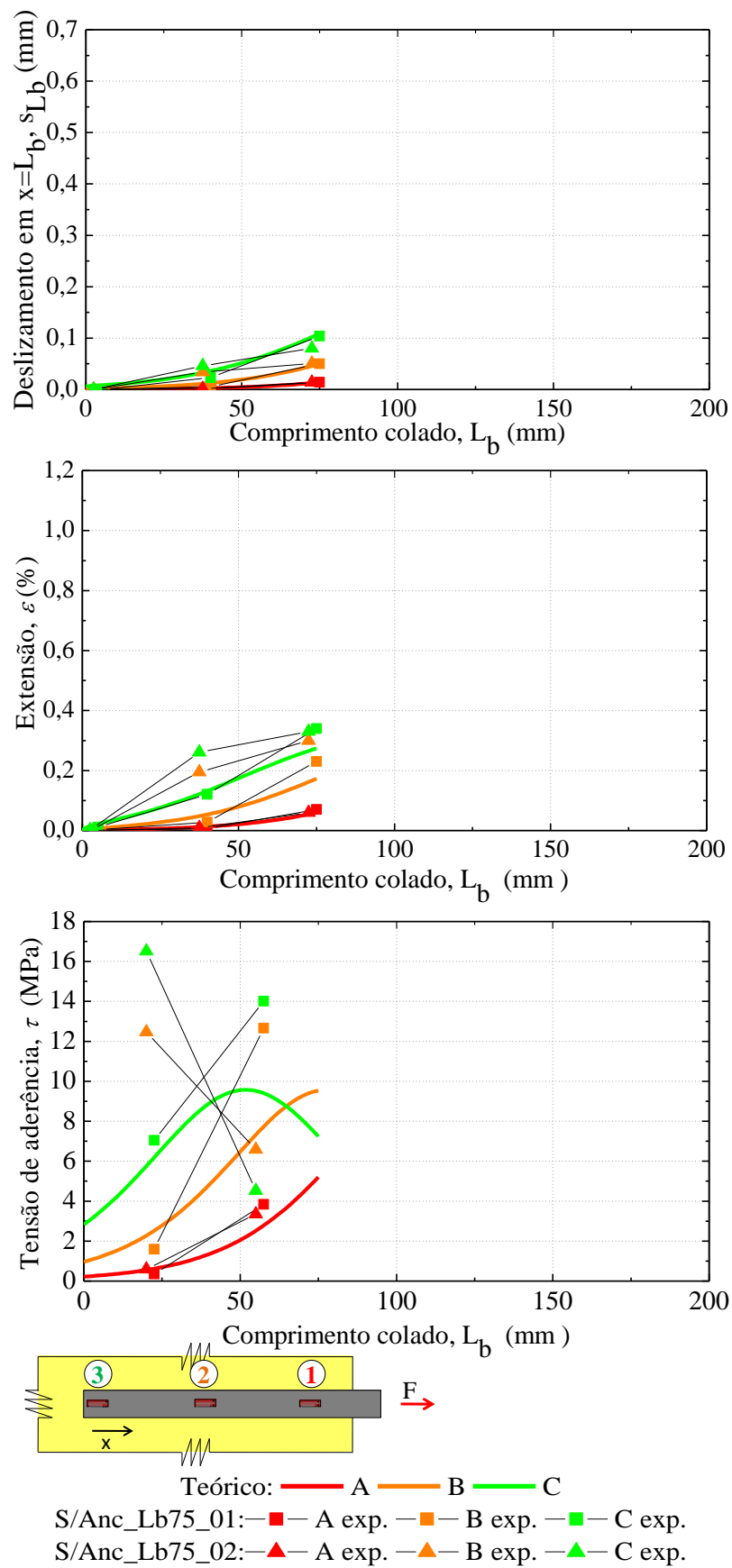


Figura 6.27 - Distribuição de deslizamentos, extensões e tensões e ao longo do comprimento colado de 75 mm

No caso do comprimento colado de 50 mm, as curvas extensão vs. deslizamento da Figura 6.28 analíticas estão muito afastadas das curvas experimentais para qualquer ensaio (S/Anc_Lb50_01, S/Anc_Lb50_02 e S/Anc_Lb50_03) e os erros entre as extensões quando o deslizamento é aproximadamente 0,1 mm, para todos os ensaios é superior a 42,3%.

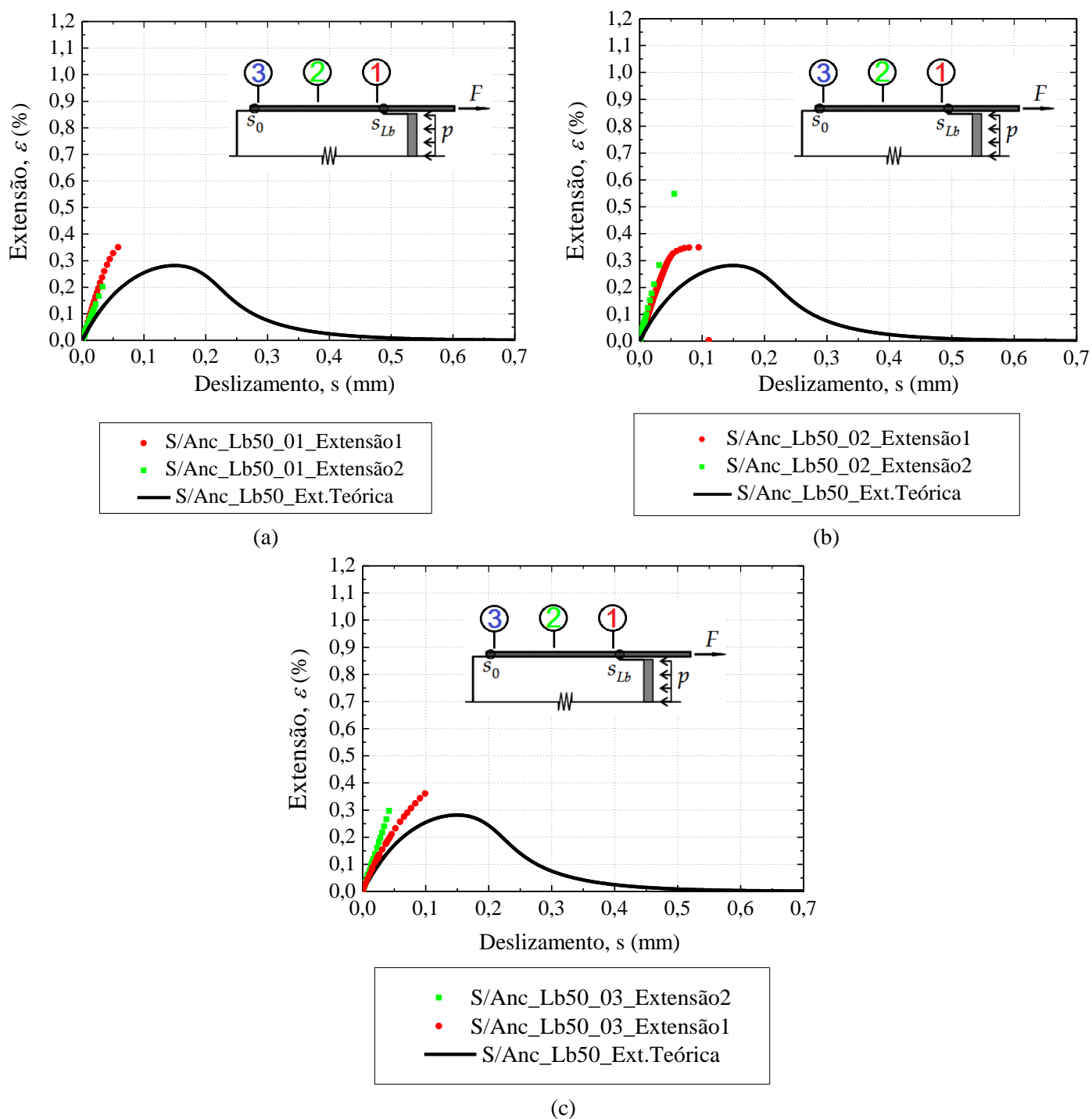


Figura 6.28 - Curvas extensão vs. deslizamento teórica e experimentais para ensaio de corte simples sem ancoragem mecânica (a) S/Anc_Lb50_01 (b) S/Anc_Lb50_02 (c) S/Anc_Lb50_03

As curvas força vs. deslizamento experimentais, apresentadas na Figura 6.29 tendem todas para o mesmo valor de força máxima, mas com andamentos um pouco diferentes. As curvas correspondentes aos ensaios S/Anc_Lb50_01 e S/Anc_Lb50_02 estão mais semelhantes entre si e o ensaio S/Anc_Lb50_03 é o mais afastado destes, porém é o ensaio que está com mais semelhanças que a curva força vs. deslizamento analítica. A curva analítica tem um valor de força máxima muito inferior aos valores obtidos experimentais. O ensaio S/Anc_Lb50_01 tem um erro de 36,3% entre as forças máximas da curva analítica e do ensaio experimental. O ensaio S/Anc_Lb50_02 tem 21,5% e por último o ensaio S/Anc_Lb50_03 tem de 20,4%.

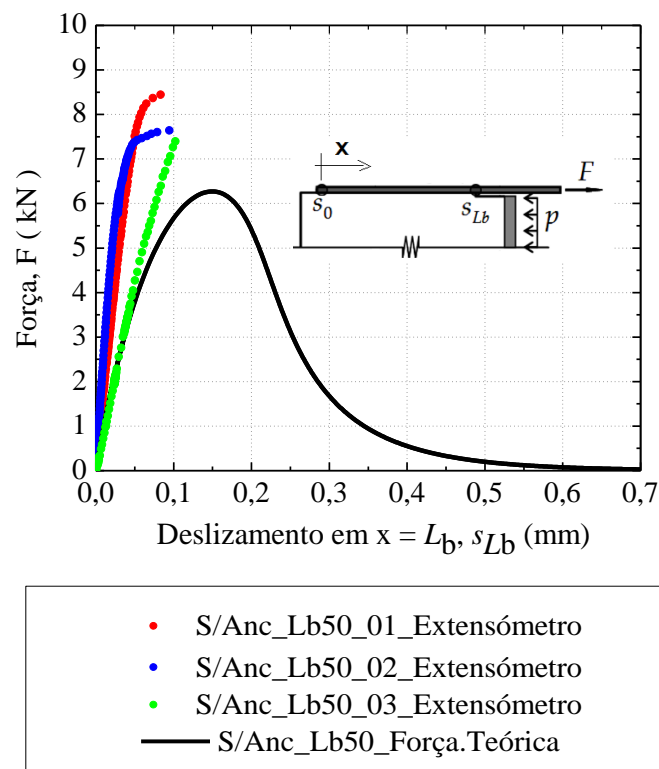
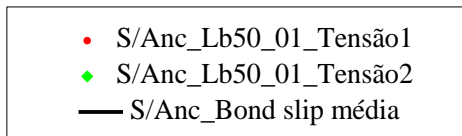
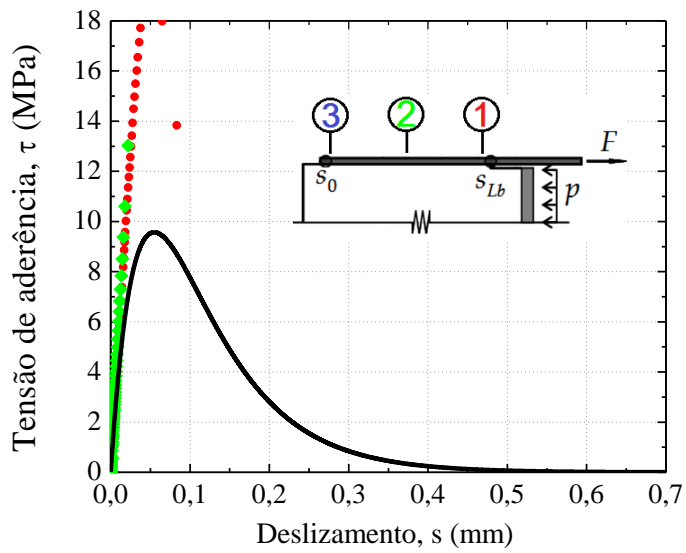
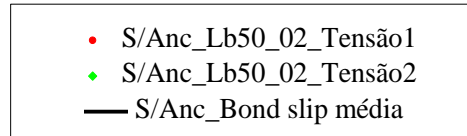
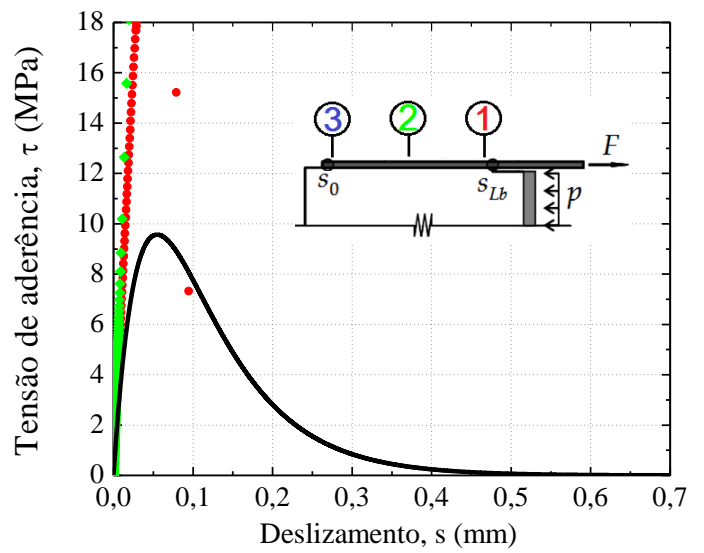


Figura 6.29 - Curva força vs. deslizamento teórica e experimental para ensaio de corte simples sem ancoragem mecânica para comprimento colado de 50 mm

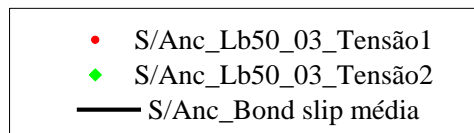
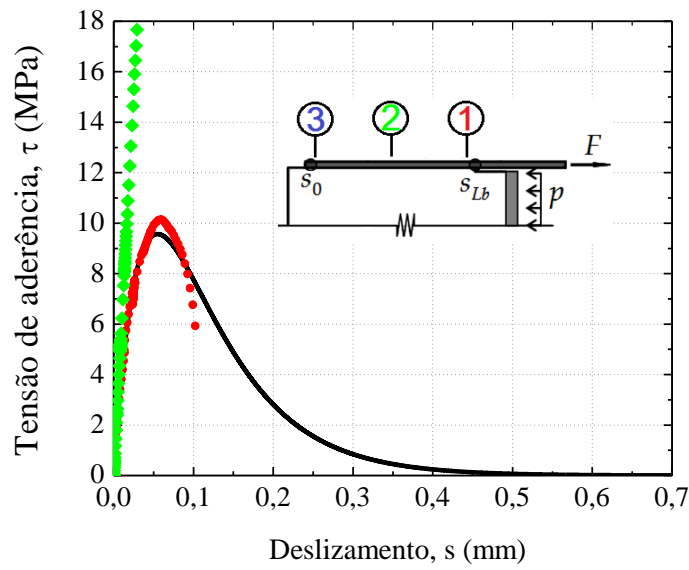
Para comprimentos colados mais curtos a curva tensão de aderência vs. deslizamento experimental tende a tomar valores muito altos de pico. É quase impossível arranjar uma curva analítica que se ajuste a estes valores conforme a Figura 6.30 mostra.



(a)



(b)



(c)

Figura 6.30 - Curvas de tensão de aderência vs. deslizamento teórica e experimentais (a) S/Anc_Lb50_01 (b) S/Anc_Lb50_02 (c) S/Anc_Lb50_03

Para o comprimento colado de 50 mm também se analisaram as distribuições de deslizamentos, extensões e extensões ao longo do comprimento colado para três pontos específicos definidos na curva de *bond-slip* média e na curva força vs. deslizamento da Figura 6.32.

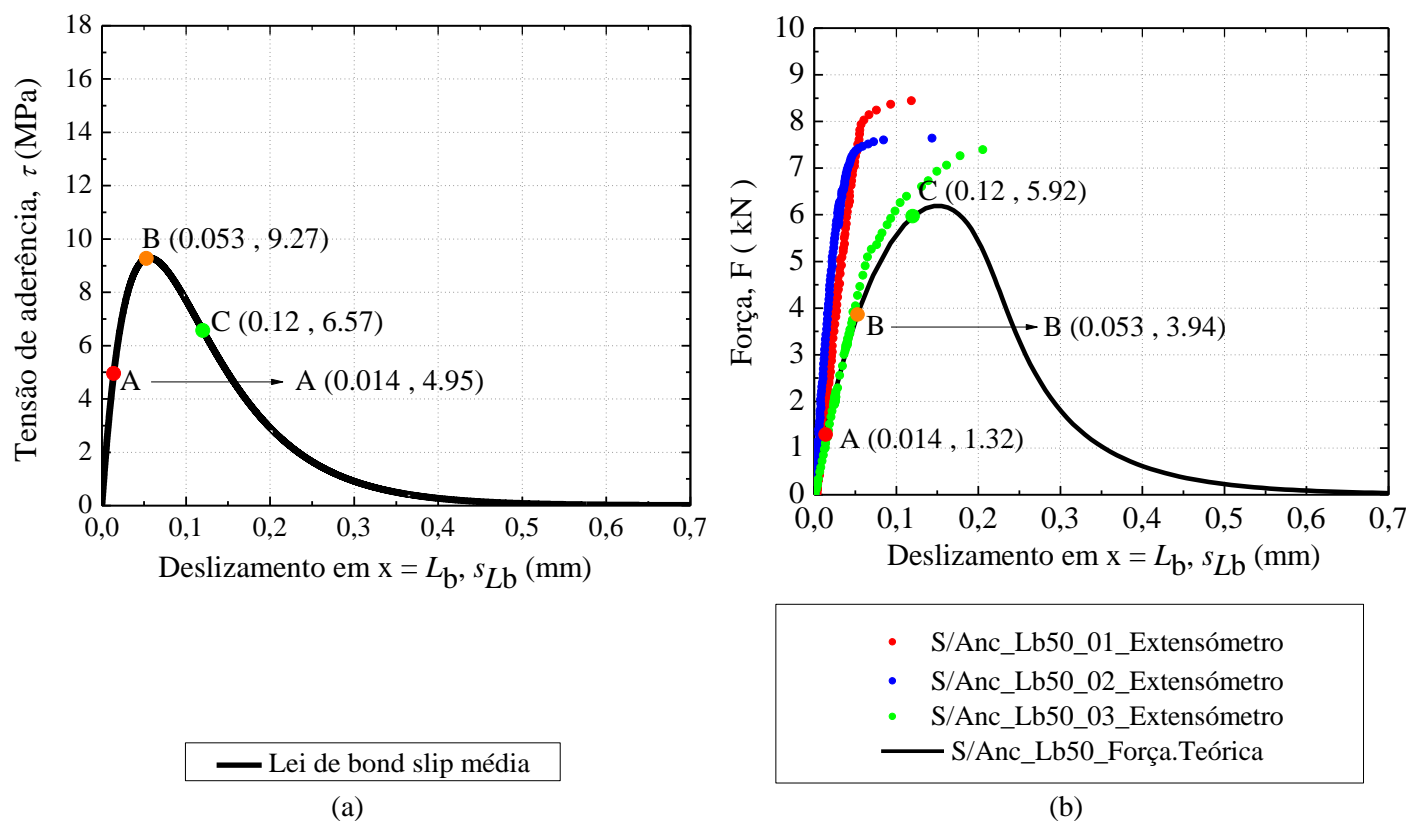


Figura 6.31 - Ensaio de corte simples sem ancoragem mecânica comprimento colado 50 mm, (a) curva tensão de aderência vs. deslizamento (b) curva força vs. deslizamento

Continua-se a ter uma boa aproximação para as curvas deslizamento e extensão ao longo do comprimento colado, no entanto, as curvas correspondentes às tensões de aderência ao longo do comprimento ficam ainda mais confusas e diferentes para comprimentos colado muito curtos., conforme a Figura 6.32 mostra.

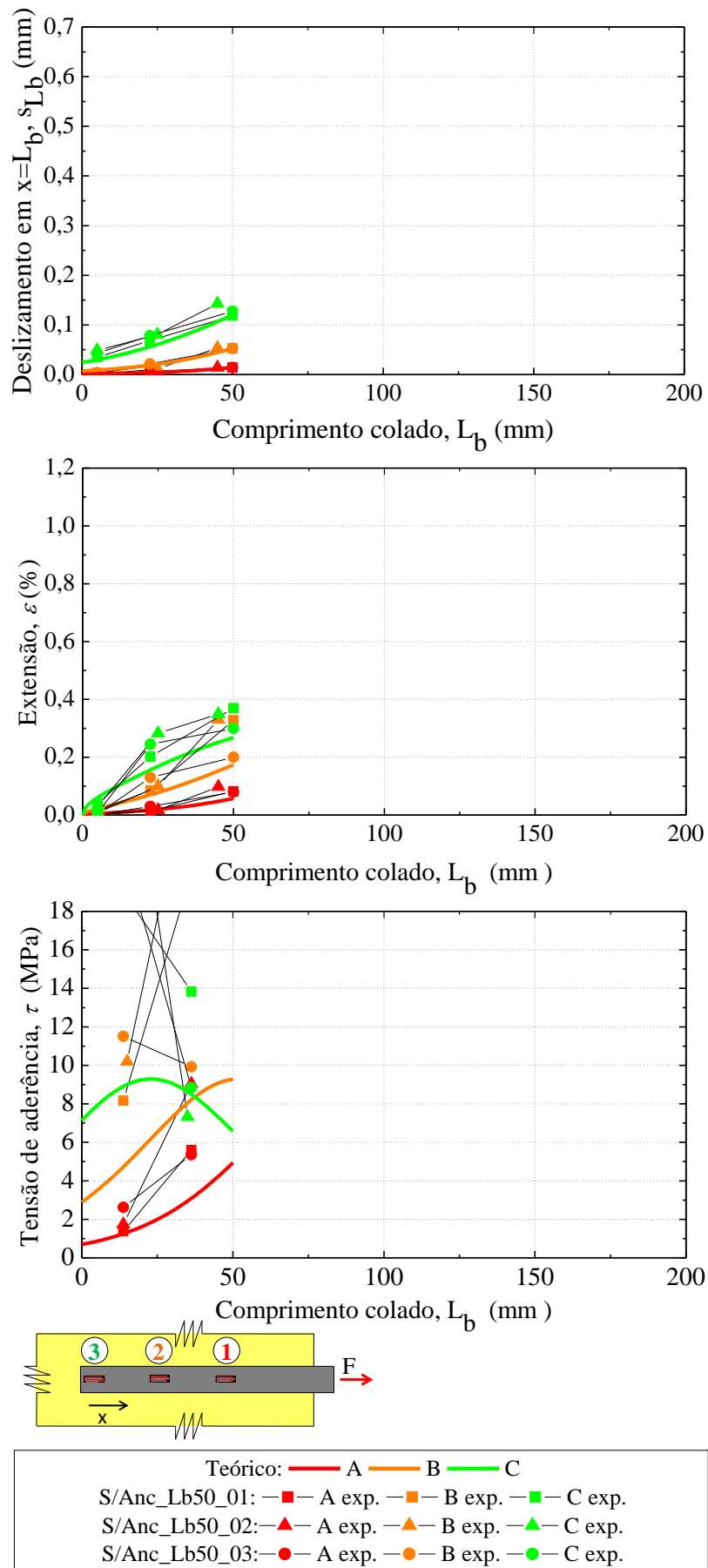


Figura 6.32 - Distribuição de deslocamentos, extensões e tensões e ao longo do comprimento colado 50 mm

6.1.4. Forças máximas nos provetes sem ancoragem mecânica

Conforme já se referiu anteriormente, a $F_{\text{máx}}$ depende do comprimento colado. Assim, agrupando os valores obtidos experimentalmente no gráfico da Figura 6.33, e comparando com os resultados obtidos pela via analítica, verifica-se que a curva analítica e os resultados experimentais tem valores próximos para comprimentos colados longos, enquanto que para comprimentos colados curtos isso já não se verifica tão bem.

A cinza, limitam-se os resultados analíticos obtidos quando se usam as curvas *bond-slip* superior e inferior obtidas experimentalmente (veja-se a Tabela 6.1). Desta forma, tenta-se perceber se os resultados experimentais poderiam ser simulados analiticamente apesar da dispersão das curvas *bond-slip* da ligação CFRP/aço obtidas experimentalmente.

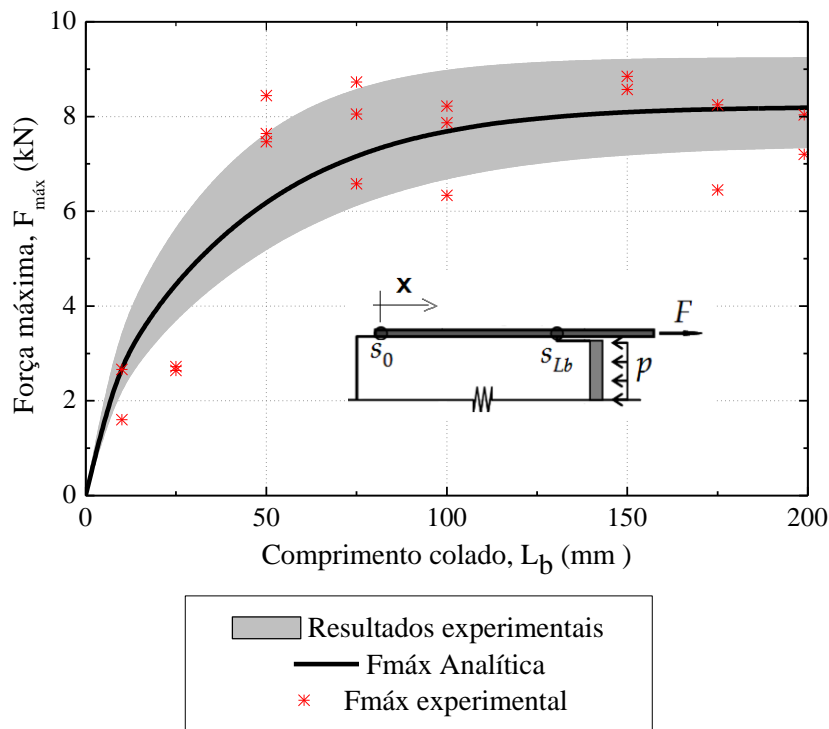


Figura 6.33 – Curva força máxima vs. comprimento colado do composto CFRP

Nota-se, da observação do gráfico da Figura 6.33 que as curvas analíticas baseadas nas leis *bond-slip* superior e inferior, abrangem quase todos os valores obtidos experimentalmente. Verifica-se assim, que o modelo analítico proposto consegue estimar com boa aproximação a resistência da ligação CFRP/aço.

6.2. Ensaio de corte simples com ancoragem mecânica

A validação do modelo analítico proposto é feita através da sobreposição das curvas obtidas a partir do modelo com as curvas experimentais obtidas no capítulo 5. A mesma organização seguida no capítulo 6.1 é, também, seguida nestes ensaios com a amarração mecânica, i.e., apresentam-se, primeiro, as curvas com comprimentos colados superiores ao comprimento efetivo e em seguida os comprimentos colados inferiores ao comprimento efetivo.

6.2.1. Comprimento colado superior ao comprimento efetivo

As curvas analíticas correspondentes à lei de *bond-slip* média dos ensaios de corte simples sem ancoragem mecânica e as curvas experimentais já evidenciadas em 5.3.1 apresentam-se, para o comprimento colado de 200 mm, para as curvas extensão vs. deslizamento na Figura 6.34, para a curva força vs. deslizamento na Figura 6.35 e para a curva tensão de aderência vs. deslizamento na Figura 6.36. A curva analítica tensão de aderência vs. deslizamento média destes ensaios com comprimento colado de 200 mm também é apresentada na Figura 6.36.

O ensaio C/Anc_Lb200_01, inicialmente até ao deslizamento 0,4 mm tem o mesmo andamento que o ensaio S/Anc_Lb200_02, ou seja, tem uma fase não linear e logo de seguida um patamar constante o que, verifica-se experimentalmente nas Figura 6.34 e Figura 6.35. O modelo analítico aproxima-se bem aos valores experimentais até ao deslizamento 0,60 mm após esse ponto o andamento torna-se linear e o declive experimental é superior ao analítico.

O ensaio C/Anc_Lb200_02 tem um andamento sempre linear até à rotura da ligação pelo CFRP, que toma o valor de 0,86%. A curva correspondente à reação (curva a preto) sentida na ancoragem mecânica para o ensaio C/Anc_Lb200_02 tem o mesmo declive da curva (curva a vermelho) correspondente à medição da extremidade carregada. A curva a azul identificada no gráfico da Figura 6.34 corresponde às tensões de aderência sentidas pela ligação CFRP/aço ao longo do comprimento colado. O modelo analítico para o ensaio C/Anc_Lb200_02 está muito afastado dos valores experimentais, o que persuadiu ao não uso deste ensaio para desenvolvimentos futuros.

Para o ensaio C/Anc_Lb200_01 da Figura 6.34a) o integral das tensões de aderência após o deslizamento 0,60 mm deixa de ser visível gráfica, pois os declives das curvas a vermelho e a preto são iguais e tomam valores muito próximos.

O ensaio C/Anc_Lb200_01 da Figura 6.34a) tem um erro de 15,2% quando o deslizamento é 0,13 mm.

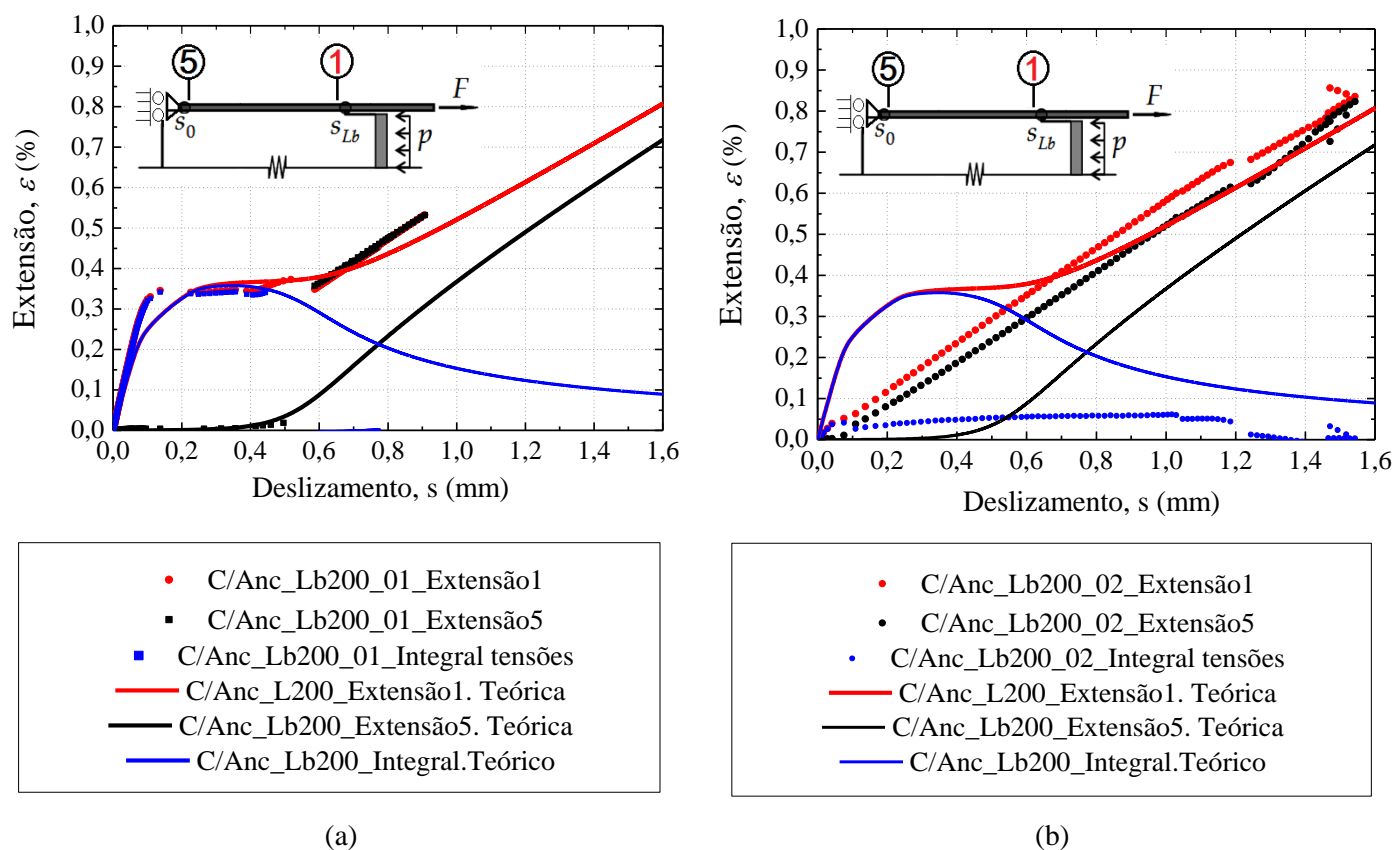
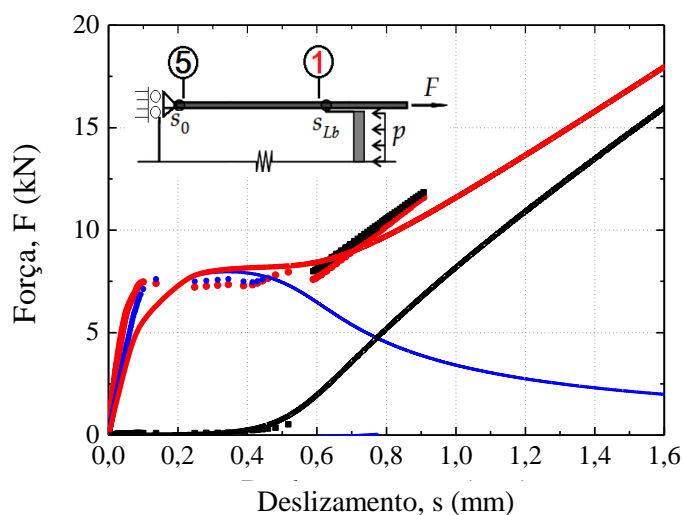


Figura 6.34 – Curvas extensão vs. deslizamento do ensaio de corte simples com ancoragem mecânica com comprimento colado 200 mm comparação com o modelo analítico (a) C/Anc_Lb200_01 (b) C/Anc_Lb200_02

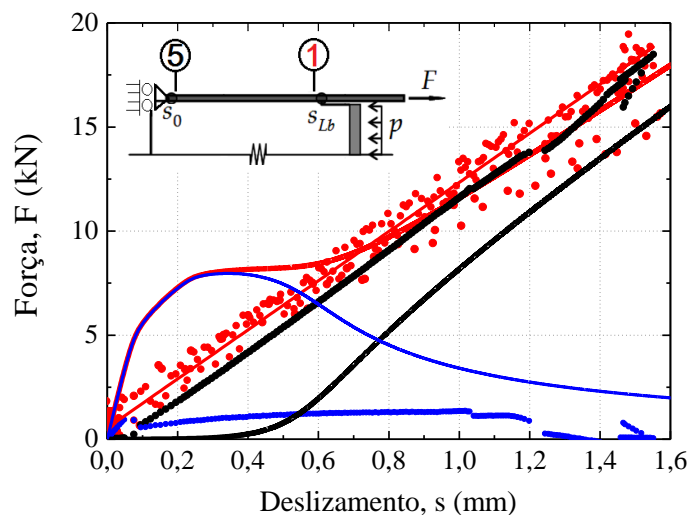
A Figura 6.36a) mostra a curva de tensões de aderência vs. deslizamento experimentais do ensaio C/Anc_Lb200_01 e a curva *bond-slip* média. Inicialmente, tanto a parte experimental como a analítica tem um comportamento ascendente não linear, porém a curva analítica toma tensão de aderência máxima para o valor de 9,29 MPa enquanto que as curvas experimentais continuam a crescer até ao valor máximo de 13,5 MPa. O erro entre estas tensões de aderência é 45,1%.

De seguida todas as curvas tendem para um valor próximo de zero, a curva analítica tem um comportamento mais amolecido do que a parte experimental, apesar de esta também ter esse comportamento mas de forma mais ligeira. Encontra-se na Figura 6.36a) valores de tensão de aderência, após o deslizamento 0,60 mm, crescentes o que deve resultar de efeitos que a ancoragem mecânica possa ter implicado no ensaio. O ensaio C/Anc_Lb200_02 não tem comportamento conhecido, preferiu-se não comentá-lo.



- C/Anc_Lb200_01_Força 1
- C/Anc_Lb200_01_Reação 5
- C/Anc_Lb200_01_Integral tensões
- C/Anc_Lb200_Força1.Teórica
- C/Anc_Lb200_Reação5.Teórica
- C/Anc_Lb200_Integral tensões.F

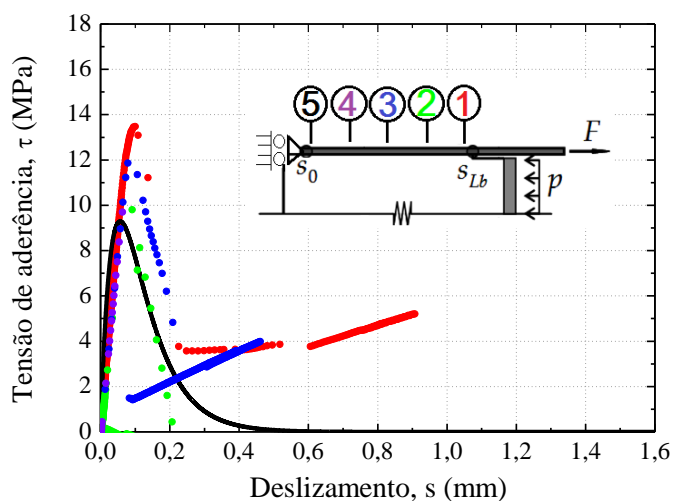
(a)



- C/Anc_Lb200_02_Força1.
- C/Anc_Lb200_02_Reação5
- C/Anc_Lb200_02_Integral
- C/Anc_Lb200_Força1.Teórica
- C/Anc_Lb200_Reação5.Teórica
- C/Anc_Lb200_Integral tensões.F
- C/Anc_Lb200_02_Força1Linha.Tend.

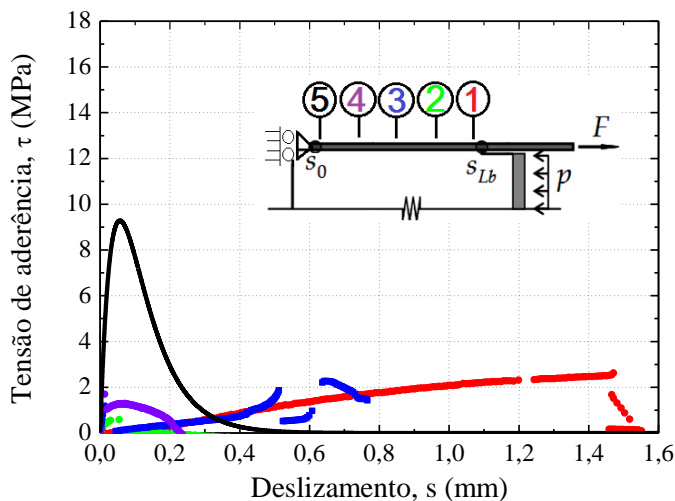
(b)

Figura 6.35 - Curvas força vs. deslocamento do ensaio de corte simples com ancoragem mecânica com comprimento colado 200 mm comparação com o modelo analítico (a) C/Anc_Lb200_01 (b) C/Anc_Lb200_02



- C/Anc_Lb200_01_Tensão1
- C/Anc_Lb200_01_Tensão2
- C/Anc_Lb200_01_Tensão3
- C/Anc_Lb200_01_Tensão4
- Lei bond-slip média S/Anc.

(a)



- C/Anc_Lb200_02_Tensão1
- C/Anc_Lb200_02_Tensão4
- C/Anc_Lb200_02_Tensão2
- C/Anc_Lb200_02_Tensão3
- Lei bond-slip média S/Anc.

(b)

Figura 6.36 – Curvas tensão de aderência vs. deslocamento do ensaio de corte simples com ancoragem mecânica com comprimento colado 200 mm comparação com o modelo analítico (a) C/Anc_Lb200_01 (b) C/Anc_Lb200_02

As distribuições de deslizamento, extensão e tensão ao longo do comprimento colado com ancoragem mecânica apresenta-se na Figura 6.38 e os pontos definidos para o estudo dessas curvas encontram-se na Figura 6.37.

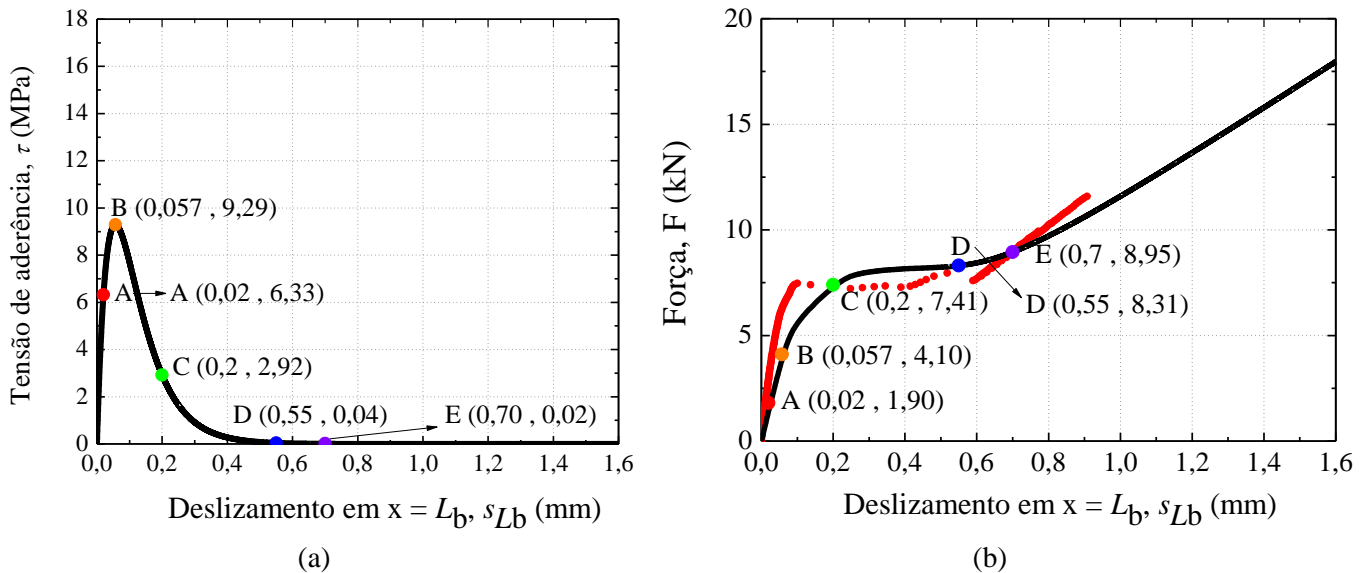


Figura 6.37 - Comprimento colado 200 mm, ensaio de corte simples com ancoragem mecânica (a) curva tensão de aderência vs. deslizamento (b) curva força vs. deslizamento

Apenas usam-se os resultados experimentais do ensaio C/Anc_Lb200_01, pois são os valores experimentais mais próximos dos valores analíticos.

Verifica-se uma boa aproximação do modelo analítico relativamente aos ensaios experimentais. A distribuição dos deslizamentos ao longo do comprimento colado cumpre com todos os requerimentos necessários, i.e., o deslizamento na extremidade ancorada mecanicamente é sempre nula para quaisquer valores de força.

Repare-se que para os pontos D e E, onde a reação na ancoragem mecânica ($x = 0$) começa a tomar valores diferentes de zero, a extensão nessa extremidade, i.e. em $x = 0$, é diferente, também de zero (veja-se a Figura 6.38).

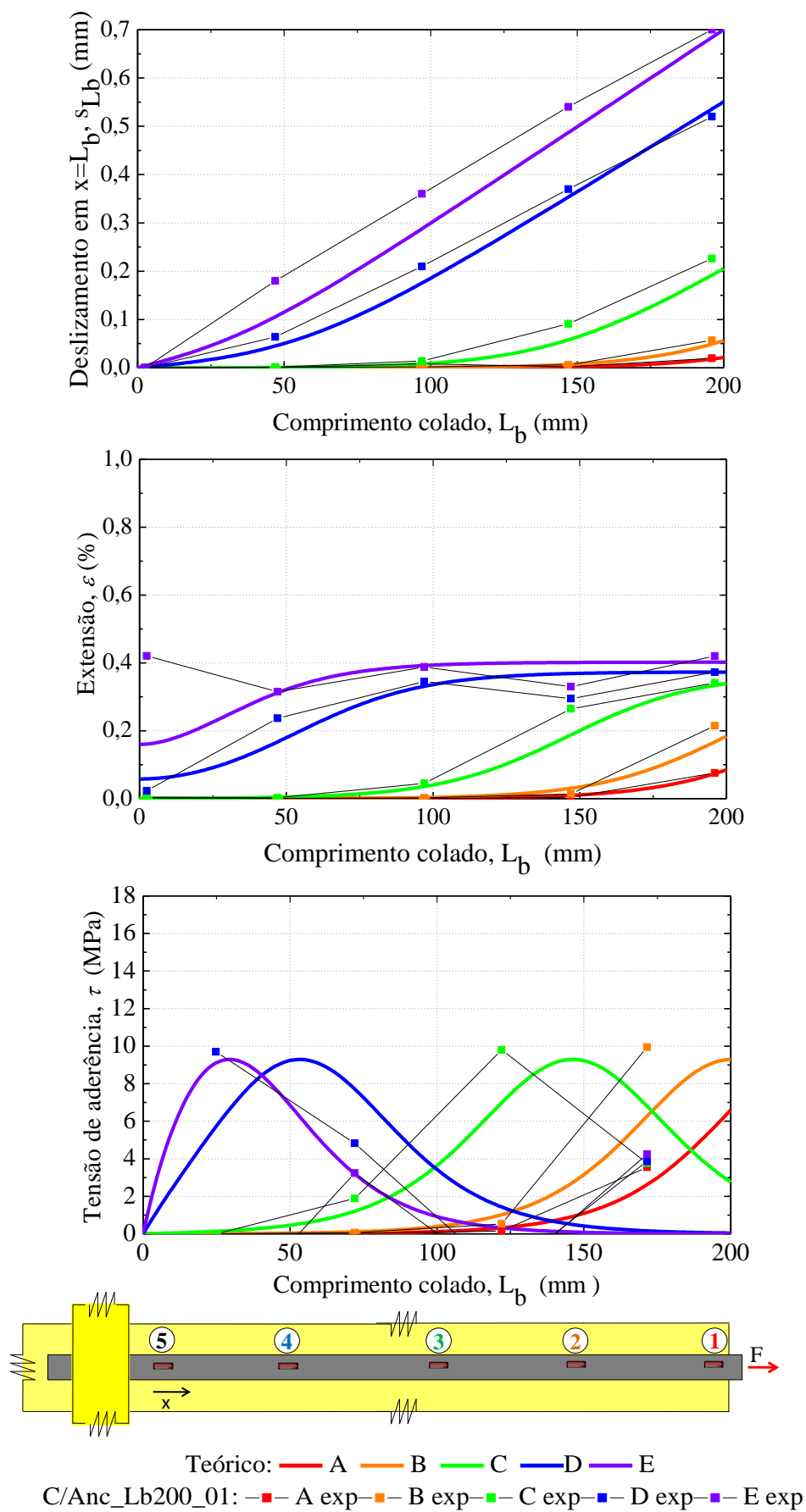


Figura 6.38 - Distribuição de deslocamentos, extensões e tensões e ao longo do comprimento colado 200 mm

6.2.2. Comprimento colado inferior ao comprimento efetivo

Para os comprimentos colados inferiores ao comprimento efetivo obtiveram-se as curvas extensão vs. deslizamento, força vs. deslizamento e tensão de aderência vs. deslizamento para os ensaios com comprimento colado de 50 mm (C/Anc_Lb50_01 e C/Anc_Lb50_02).

Os valores experimentais da Figura 6.39a) encontram-se abrangidos pelo modelo analítico, o que conduz a uma razoável aproximação do modelo analítico. Verifica-se que a curva correspondente a extremidade carregada tem o declive muito próximo do declive da curva analítica correspondente. Nota-se, também, nesse mesmo gráfico que os valores experimentais relativos à reação da ancoragem têm uma inclinação superior à inclinação da curva a vermelho.

No ensaio C/Anc_Lb50_01, quando o deslizamento é 0,1 mm o erro entre a curva analítica e experimental para a extremidade carregada é de 30,4%. No entanto, o ensaio C/Anc_Lb50_02 o erro é 14,9%, inferior ao ensaio C/Anc_Lb50_01, porém este ensaio tem o modelo analítico mais próximo dos valores experimentais. As mesmas análises são feitas para a Figura 6.40. A Figura 6.41 mostra as curvas tensão de aderência vs. deslizamento dos ensaio C/Anc_Lb50_01 e C/Anc_Lb50_01. A curva analítica não se aproxima de nenhuma curva experimental graficamente representada.

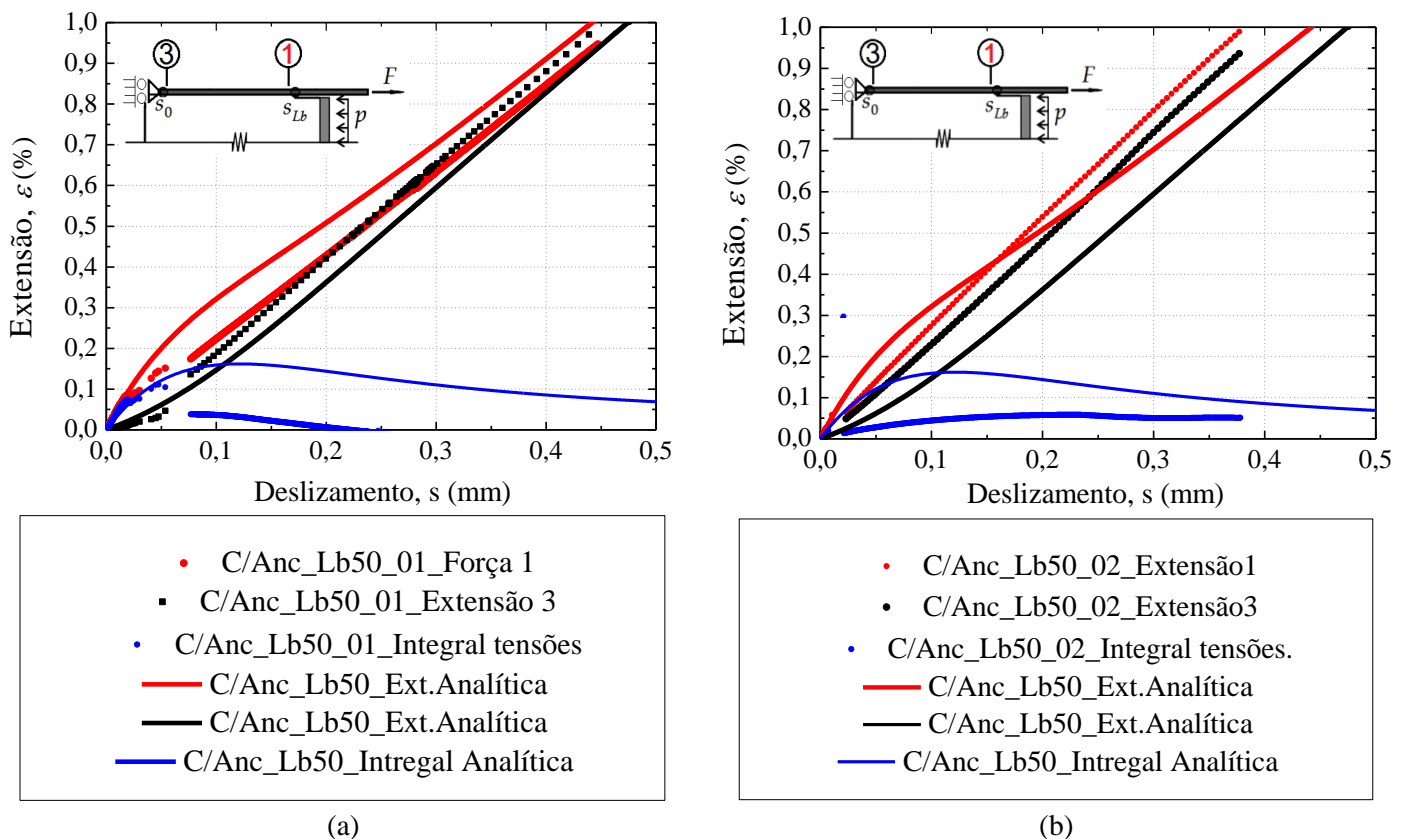
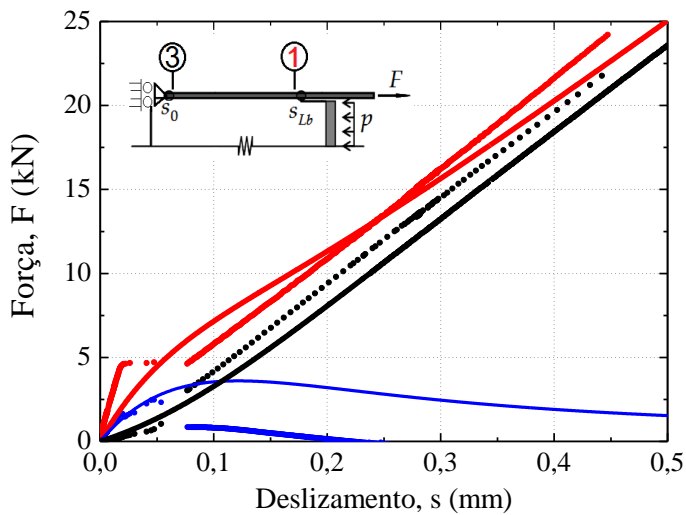
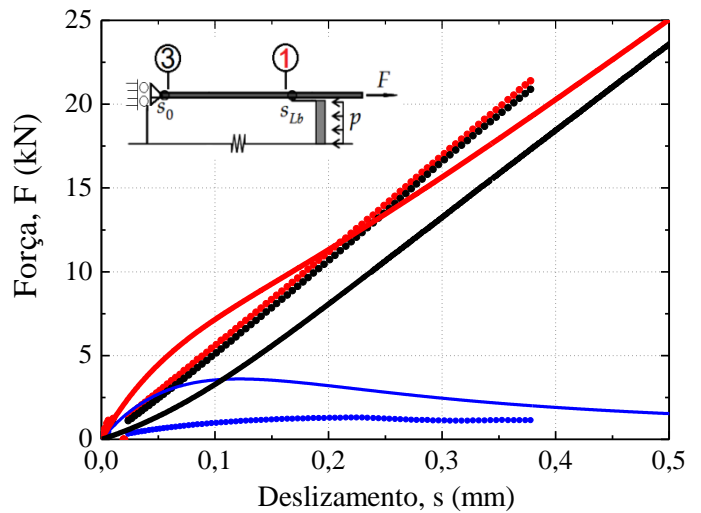


Figura 6.39 – Curvas extensão vs. deslizamento do ensaio de corte simples com ancoragem mecânica com comprimento colado 50 mm comparação com o modelo analítico (a) C/Anc_Lb50_01 (b) C/Anc_Lb50_02



- C/Anc_Lb50_01_Força 1
- C/Anc_Lb50_01_Reação 3
- C/Anc_Lb50_01_Integral tensões
- C/Anc_Lb50_Força1.Analítica
- C/Anc_Lb50_Reação3.Analítica
- C/Anc_Lb50_Intregal Analítica

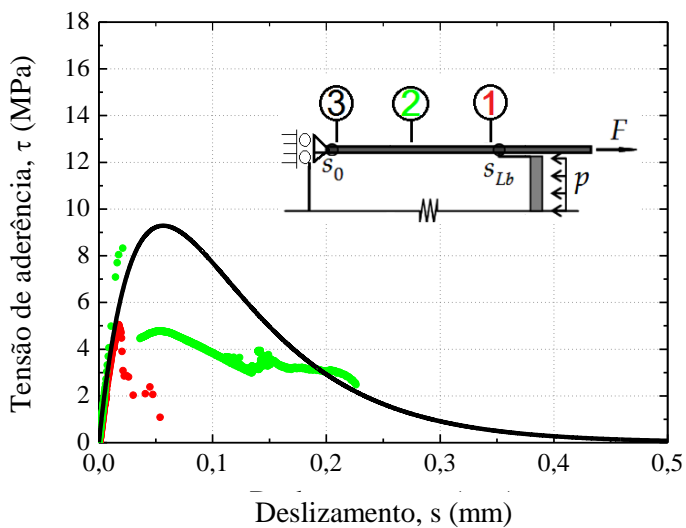
(a)



- C/Anc_Lb50_02_Força1
- C/Anc_Lb50_02_Reação3
- C/Anc_Lb50_02_Integral tensões
- C/Anc_Lb50_Força1.Analítica
- C/Anc_Lb50_Reação3.Analítica
- C/Anc_Lb50_Intregal Analítica

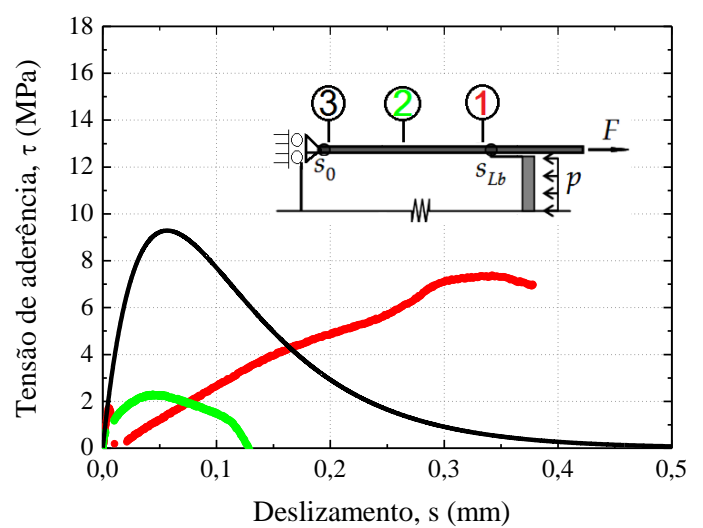
(b)

Figura 6.40 – Curvas força vs. deslocamento do ensaio de corte simples com ancoragem mecânica com comprimento colado 50 mm comparação com o modelo analítico (a) C/Anc_Lb50_01 (b) C/Anc_Lb50_02



- C/Anc_Lb50_01_Tensão1
- C/Anc_Lb50_01_Tensão2
- Lei bond-slip média S/Anc.

(a)



- C/Anc_Lb50_02_Tensão1
- C/Anc_Lb50_02_Tensão2
- Lei bond-slip média S/Anc.

(b)

Figura 6.41 - Curvas tensão de aderência vs. deslocamento do ensaio de corte simples com ancoragem mecânica com comprimento colado 50 mm comparação com o modelo analítico (a) C/Anc_Lb50_01 (b) C/Anc_Lb50_02

As distribuições de deslizamento, extensão e tensão ao longo do comprimento colado com ancoragem mecânica apresenta-se na Figura 6.43 e os pontos definidos para o estudo dessas curvas encontram-se na Figura 6.42.

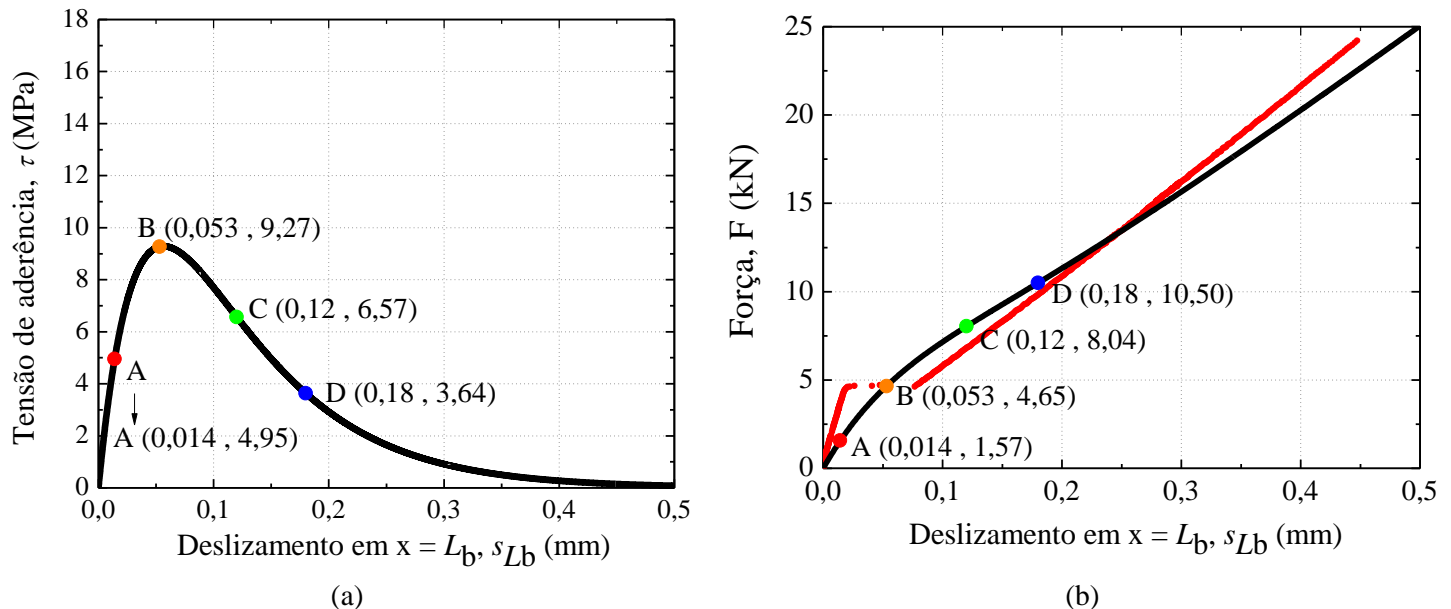


Figura 6.42 – Comprimento colado 50 mm, ensaio de corte simples com ancoragem mecânica (a) curva tensão de aderência vs. deslizamento (b) curva força vs. deslizamento

Verifica-se uma boa aproximação do modelo analítico relativamente aos ensaios experimentais. A distribuição dos deslizamentos ao longo do comprimento colado cumpre com todos os requerimentos necessários, i.e., o deslizamento na extremidade ancorada mecanicamente é sempre nula para quaisquer valores de força, como já foi referido.

Repare-se que para os pontos B, C e D, onde a reação na ancoragem mecânica ($x = 0$) começa a tomar valores diferentes de zero, a extensão nessa extremidade, i.e. em $x = 0$, é diferente, também de zero (veja-se a Figura 6.43).

Neste caso os valores de tensão de aderência dão valores muito inferiores comparados com os valores experimentais dos ensaios sem ancoragem mecânica com comprimento colado de 50 mm. Tendo um comportamento mais próximo do modelo analítico, apesar de também ter sido considerada constante a tensão de aderência entre extensómetros.

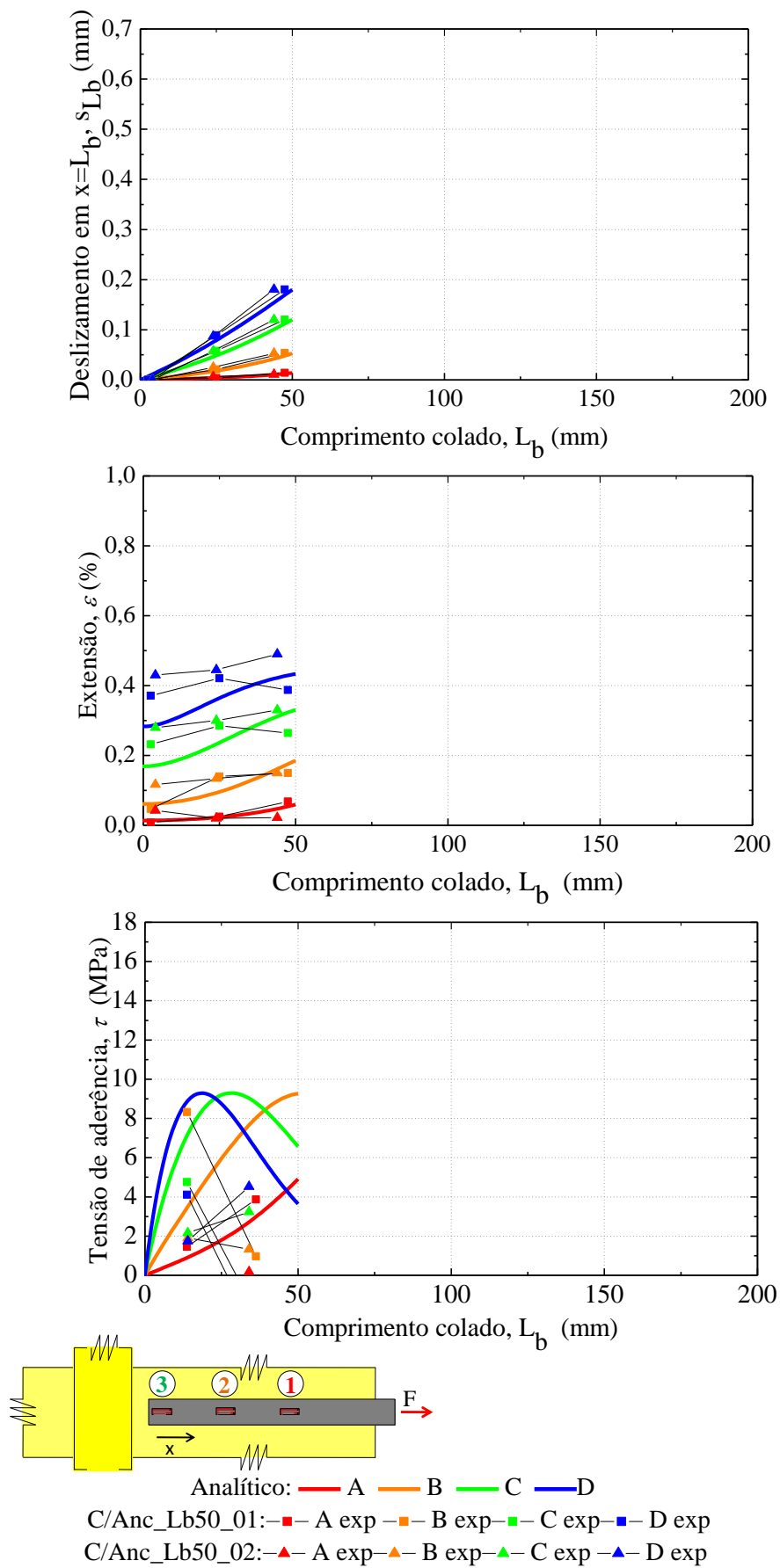


Figura 6.43 - Distribuição de deslizamentos, extensões e tensões e ao longo do comprimento colado 50 mm

6.2.3. Força máxima nos ensaios com ancoragem mecânica

Neste caso, e do ponto de vista teórico, a força máxima transmitida ao CFRP toma o valor correspondente à força de rotura do laminado de CFRP. Assim, dos ensaios de tração do CFRP, a força máxima correspondente à rotura do CFRP é de 21,91 kN ($\epsilon_{\max} = 0,98\%$).

No total, foram ensaiados quatro provetes com ancoragem mecânica, em que os comprimentos colados foram escolhidos de forma a garantir que se tinham comprimentos superiores e inferiores ao comprimento efetivo da ligação FRP/aço.

A Tabela 6.2 mostra os valores de força máximos obtidos experimentalmente no compósito de CFRP com o respetivo deslizamento. Comparando os valores obtidos verifica-se que o ensaio C/Anc_Lb200_01 foi aquele que proporcionou uma maior diferença de resultados.

Tabela 6.2 – Valores das forças máximas e deslizamentos obtidos experimentalmente em comparação com o valor da força máxima analítica do compósito de FRP.

Nomenclatura	Força máxima experimental, F_{\max} (kN)	Comprimento colado, L_b (mm)	Deslizamento, s (mm)	Força máxima teórica do CFRP (kN)	Erro (%)
Comprimento colado superior ao comprimento efetivo, $L_b > L_{\text{eff}}$					
C/Anc_Lb200_01	11,59	200	0,91	21,91	47,1
C/Anc_Lb200_02	21,22	200	1,55	21,91	3,14
Comprimento colado inferior ao comprimento efetivo, $L_b < L_{\text{eff}}$					
C/Anc_Lb50_01	24,20	50	0,45	21,91	10,5
C/Anc_Lb50_02	21,38	50	0,38	21,91	2,42

6.3. Comparação com outros estudos

A presente secção pretende comparar o método analítico não linear proposto nesta dissertação com outros estudos experimentais e numéricos já existentes. No entanto, existe uma ausência de estudos na bibliografia que contemplam o processo de descolamento completo da ligação FRP/aço, por essa razão a validação do modelo analítico proposto apenas é feita para estudos de ligação FRP/betão.

O modelo *bond-slip* exponencial assumido na proposta analítica atual permite comparar os resultados daí provenientes com os trabalhos desenvolvidos por Biscaia *et al.* [7] Ferracuti [18] e

Viegas [31]. Sendo assim as curvas de carga vs. deslizamento são apresentadas e são motivo de análise nas seguintes subsecções.

6.3.1. Trabalho experimental e numérico de Biscaia *et al.*[11]

A proposta numérica de Biscaia et al. [11] utiliza a fórmula de Popovics [37] para descrever o comportamento da ligação do GFRP/betão e o modelo *bond-slip* exponencial proposto por Dai et al. [29] foi introduzido no modelo numérico de Biscaia et al. [11], os resultados numéricos estão visíveis na Figura 6.44. A Figura 6.44 mostra, também, os resultados experimentais a partir de [24]. O modelo proposto analítico não linear é, também, confrontado com os outros dois casos na Figura 6.44. Os parâmetros utilizados em [11] para definir a curva de *bond-slip* exponencial são $t_p = 2,54$ mm, $b_p = 80$ mm, $E_p = 20,39$ GPa, $\tau_{max} = 4,24$ MPa, $s_{max} = 0,10$ mm e $s_{ult} = 0,72$ mm.

Assim, a partir da Figura 6.44 nota-se que as propostas numéricas e analíticas não lineares são bastante semelhantes. As diferenças observadas na Figura 6.44 são justificadas pela limitação do deslizamento no modelo *bond-slip*, ou seja, no caso numérico de [24], o início de descolamento foi definido quando $s_{ult} = 0,72$ mm, enquanto que no modelo analítico não linear foi assumido sem essa limitação.

Essencialmente, esta opção conduziu às duas consequências seguintes: (i) menos precisão na definição da carga máxima transmitida ao compósito FRP (F_{max}) porque o patamar que está associado a F_{max} quando um s_{ult} é assumido tem uma ligeira inclinação, no caso de deslizamento sem limitações; e (ii) uma diferente resposta pós-pico, ou seja, quando não há limitações de deslizamento é assumido que a resposta pós-pico apresenta um fenómeno de *snap-back* onde os deslizamentos da interface após diminuírem, visam a aumentar tendencialmente para infinito. Pelo contrário, quando s_{ult} é definido o descolamento total da interface do FRP com o aço tenderá a s_{ult} .

Em qualquer caso, o comportamento pós-pico da ligação FRP/betão é bastante difícil de ser observado experimentalmente, apesar de alguns autores terem tentado reproduzir experimentalmente essa fase de deslizamento da ligação [64].

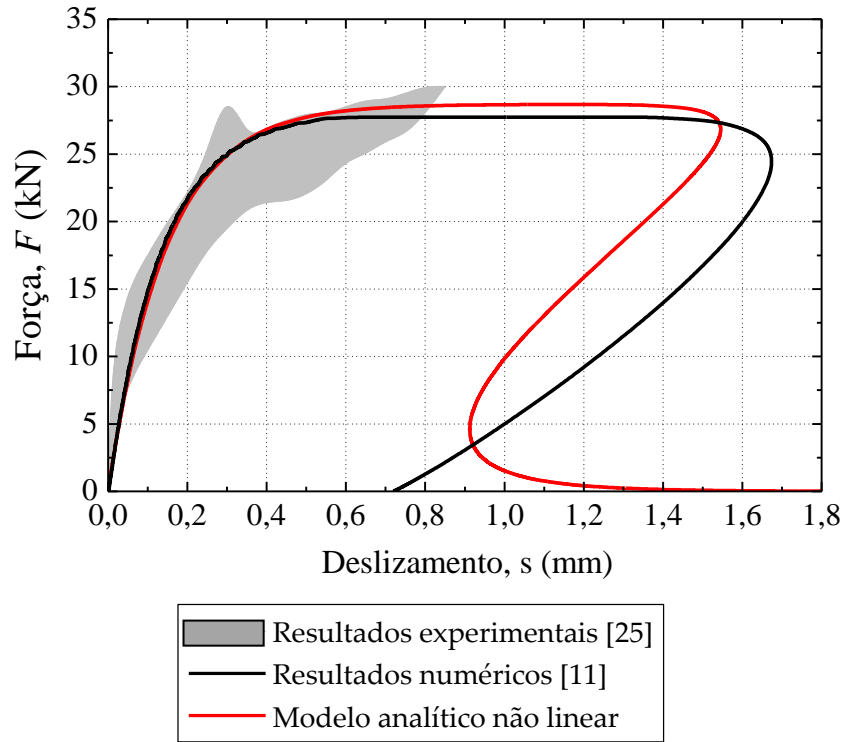


Figura 6.44 – Comparação entre o modelo proposto analítico e o trabalho desenvolvido por Biscaia *et al.* [11] para uma ligação GFRP/betão sem ancoragem mecânica assumindo L_b de 250 mm.

6.3.2. Trabalho numérico de Viegas

Viegas [34] estudou vários aspetos com influência direta no desempenho da ligação do FRP/betão. Um desses aspetos foi sobre a influência de uma ancoragem mecânica sobre a ligação do FRP/betão. Viegas [34] utilizou um modelo *bond-slip* não linear com base na fórmula do Popovics [37] como se segue:

$$\tau(s) = \tau_{\max} \cdot \frac{\frac{s}{s_{\max}} \cdot n}{(n-1) + \left(\frac{s}{s_{\max}}\right)^n} \quad (6.1)$$

onde n é a constante de Popovics. Durante as suas simulações, Viegas [34] assumiu os seguintes parâmetros de referência para a ligação GFRP/betão: $t_p = 2,54$ mm, $b_p = 80$ mm, $E_p = 20,39$ GPa. O substrato foi considerado rígido quando comparado com o compósito de GFRP e o modelo de *bond-slip* foi baseado no trabalho experimental de Biscaia [45] : $s_{\max} = 0,10$ mm, $\tau_{\max} = 4,24$ MPa, $G_f = 1.23$ N/mm e $B = 6,86$ mm⁻¹. A fim de fazer uma comparação válida entre os resultados obtidos de Viegas [34] e o modelo analítico não linear proposto, o modelo de *bond-slip*

exponencial deverá ser bastante semelhante à fórmula de Popovics utilizada no trabalho de Viegas [34]. Isso pode ser atingido se a tensão máxima de aderência e o deslizamento máximo forem definidos inicialmente e na fórmula de Popovics [37] a constante n for 3,0. A Figura 6.45 mostra os modelos *bond-slip*. Deve notar-se também, que Viegas [34] considerou o deslizamento correspondente ao início da descolagem igual a $s_{ult} = 0,72$ mm, o que reduz a energia de fratura para $G_f = 1,05$ N/mm e que altera o desempenho da ligação na fase de pós-colapso, conforme referido anteriormente.

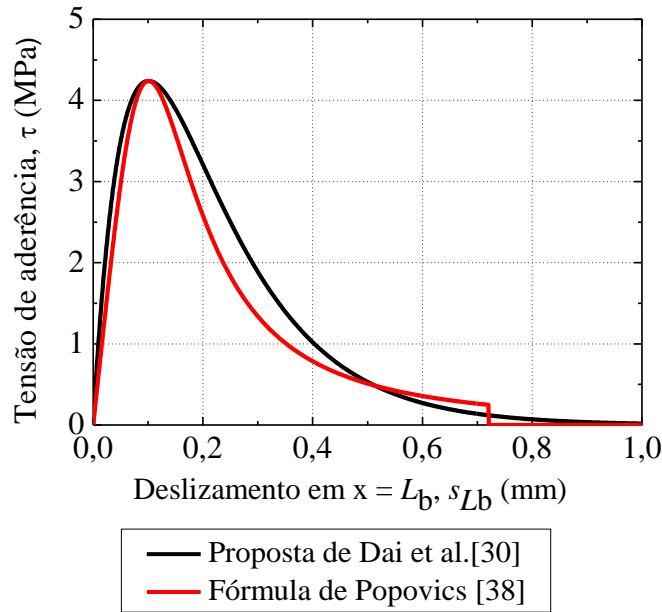


Figura 6.45 – Diferenças entre o modelo *bond-slip* Dai [29] o modelo *bond-slip* Popovics [37]

Dois comprimentos colados distintos foram assumidos e as diferenças entre os modelos comparadas. A Figura 6.46 mostra as diferenças obtidas entre o desempenho da ligação GFRP/betão com $L_b = 50$ mm e $L_b = 250$ mm e, ao mesmo tempo, também permite a comparação entre o modelo analítico não linear proposto e os resultados numéricos de Viegas [34].

A Figura 6.46 mostra que a carga transmitida ao compósito de GFRP (F) e reação (R) na ancoragem mecânica são bem estimadas. Além disso, a Figura 6.46 mostra, a partir da Eq.(3.45) da página 46, o integral (I) das tensões de aderência ao longo do comprimento colado e que foi calculado. As diferenças observadas são devidas às diferenças nos modelos *bond-slip* não lineares utilizados em ambos os estudos. Por exemplo, para $L_b = 250$ mm ($L_b > L_{eff}$) e antes da reação começar a aumentar, i.e., sem qualquer influência da ancoragem mecânica, o desempenho da carga máxima transmitida para a ligação GFRP/betão é calculada de acordo com:

$$F_{max} = b_p \cdot \sqrt{2G_f \cdot E_p \cdot t_p} \quad (6.2)$$

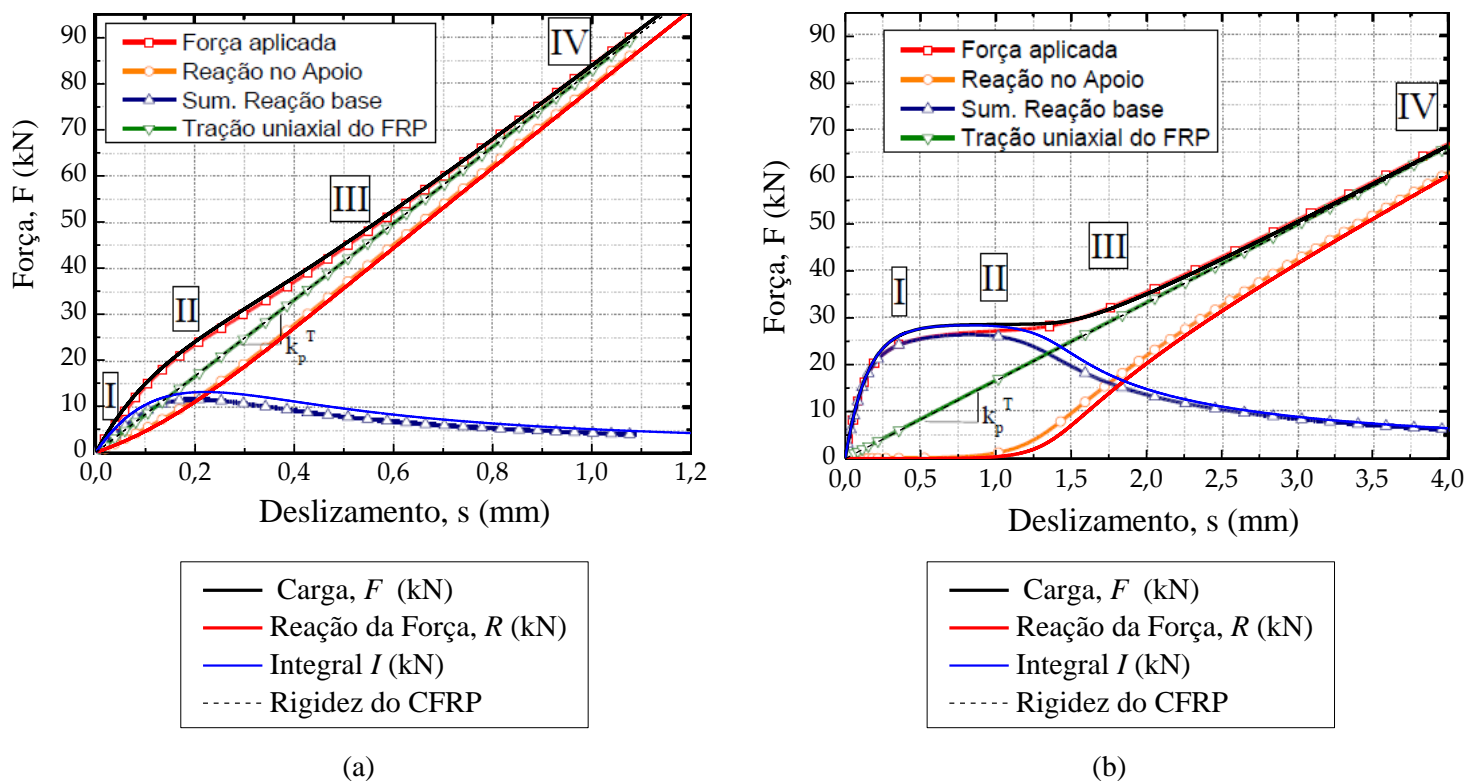


Figura 6.46 – Comparação/sobreposição entre o modelo analítico não linear proposto e o trabalho desenvolvido por Viegas [34] para uma ligação GFRP/betão com ancoragem mecânica assumindo: (a) $L_b = 50$ mm; (b) $L_b = 250$ mm.

Assim, a carga máxima transmitida ao compósito de FRP diminui se a energia de fratura, G_f , também diminuir. Nesta análise em particular, a energia de fratura de Viegas [34] é 14,5% menor do que a assumida no modelo analítico não linear proposto, conforme mostra a Figura 6.45, o que justifica as diferenças encontradas a partir desta fase em diante. Outro aspeto importante do processo de descolamento da ligação FRP/aço com uma ancoragem mecânica é o aumento significativo da carga transmitida para o compósito FRP que pode ser alcançado por um comprimento colado mais reduzido, i.e, menor que o comprimento efetivo. Nesse caso, a força de reação tem um aumento rápido para baixas cargas transmitidas ao compósito FRP sem promover o descolamento completo do compósito de FRP.

6.3.3. Trabalho experimental e numérico de Ferracuti

O modelo analítico proposto também é comparado com o trabalho experimental e numérico realizado por Ferracuti [22]. Ferracuti [22] realizou ensaios de corte simples com uma área de fixação colocado no lado oposto da extremidade carregada do CFRP a fim de simular o descolamento do CFRP/betão com uma ancoragem mecânica.

Neste subcapítulo o modelo analítico não linear proposto é comparado com trabalhos numéricos e experimentais encontrados em [22]. Ferracuti [22] assumiu um modelo *bond-slip* não linear com base na fórmula Popovics [37] para descrever o comportamento da ligação CFRP/betão. Com base em experiências, Ferracuti [22] atingiu os seguintes parâmetros de referência para definir o modelo *bond-slip* não linear da ligação CFRP/betão: $n = 4,44$, $s_{\max} = 0,044$ mm $\tau_{\max} = 6,43$ MPa, $G_f = 0,452$ N/mm. As propriedades geométricas e mecânicas do compósito de CFRP usado por Ferracuti [22] são: $t_p = 1,2$ mm, $b_p = 80$ mm, $L_b = 355$ milímetros e $E_p = 165,00$ GPa.

Um modelo de *bond-slip* exponencial equivalente foi determinado com base na minimização dos mínimos quadrados entre as tensões de aderência obtidos a partir de fórmula Popovics [37] e da expressão exponencial proposto por Dai *et al.* [29] (ver Eq. (2.30) da página 27). Em ambos os modelos a energia de fratura e tensão máxima de aderência é igual no processo de minimização:

$$\min = \sum_{i=1}^N (\tau_{P,i} - \tau_{D,i})^2 \quad (6.3)$$

onde $\tau_{P,i}$ é a tensão de aderência obtida a partir da fórmula Popovics [37] e $\tau_{D,i}$ é a tensão de aderência obtida a partir Dai *et al.* [29]. A Figura 6.47 compara os modelos de *bond-slip* exponencial proposto por Dai e tal [30] e de Popovics [38]. O deslizamento máximo do modelo exponencial é de 0,03 mm, o que representa uma redução de 43,2% quando comparado com a fórmula de Popovics [37].

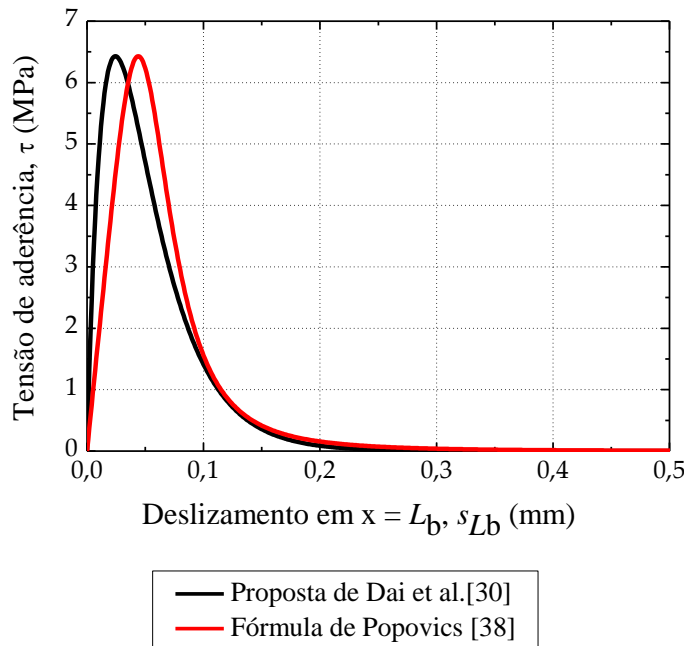


Figura 6.47 - Comparação entre o modelo *bond-slip* utilizado no trabalho de Ferracuti [22] (fórmula Popovics [37]) e no presente estudo (Modelo Dai *et al.* [29]).

A Figura 6.48 mostra a comparação entre a curva de carga vs. deslizamento obtida a partir do modelo analítico não linear proposto e o ensaio experimental e a curva de carga vs. deslizamento numérica desenvolvida por Ferracuti [22]. A reação na extremidade ancorada mecanicamente e o integral das tensões de aderência ao longo de comprimento colado obtidos são também apresentados na Figura 6.48. Como se pode observar, a curva carga vs. deslizamento ajusta-se bem aos resultados obtidos por Ferracuti [22]. As pequenas diferenças visíveis são devido às pequenas diferenças entre os dois modelos de *bond-slip* já mostradas na Figura 6.47.

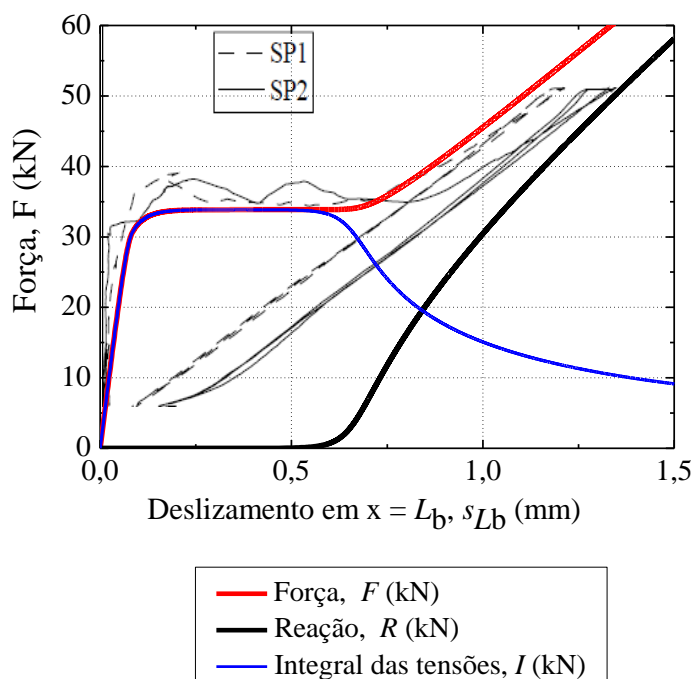


Figura 6.48 - Comparação entre o modelo analítico proposto e o trabalho desenvolvido pela Ferracuti [22] para uma ligação de CFRP/betão com uma ancoragem mecânica e com $L_b = 355$ mm.

6.4. Análise do pós-colapso da ligação CFRP/aço

Como o modelo analítico não linear proposto cobre a totalidade dos deslizamentos, então, consegue-se, obter as curvas de extensão, deslizamento e tensão ao longo do comprimento do FRP após o colapso. Optou-se por apresentar esses gráficos para o comprimento colado de 200 mm, para cobrir toda a gama de comprimentos apresentados nesta dissertação e também para estudar melhor o fenômeno de *snap-back*, pois este só acontece para comprimento colados superiores a comprimento efetivo da ligação.

Este estudo não foi apresentado no capítulo 6.1 porque não fazia sentido indicar um ponto no pós-colapso e se experimentalmente não se consegue obter a trajetória ao longo do comprimento desse mesmo ponto não se conseguiria fazer qualquer comparação. Portanto, realça-se agora esta

característica após todas as curvas descritas e comentadas para uma melhor compreensão da mesma.

6.4.1. Modelo analítico não linear sem ancoragem mecânica

A Figura 6.49 representa o modelo *bond-slip* e a curva força vs. deslizamento para $L_b = 200$ mm sem ancoragem mecânica e com os respectivos pontos analisados ao longo do comprimento colado do FRP.

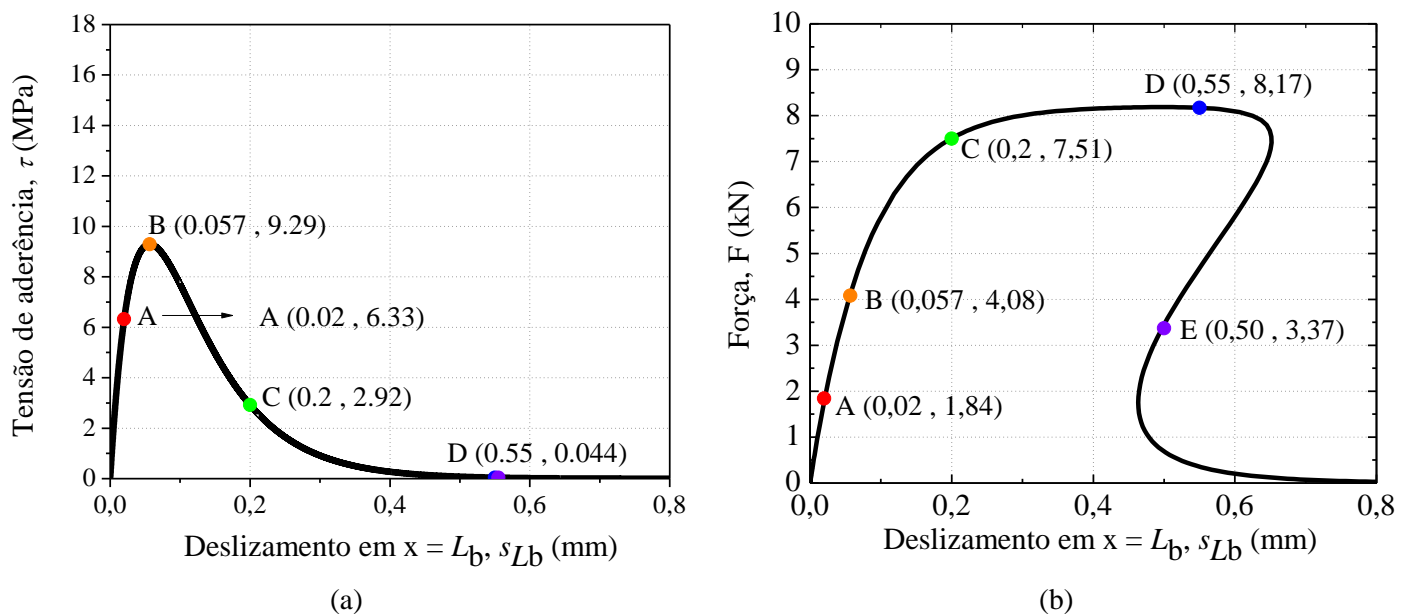


Figura 6.49 - Comprimento colado 200 mm, ensaio de corte simples sem ancoragem mecânica (a) curva tensão de aderência vs. deslizamento (b) curva força vs. deslizamento

O ponto E é um ponto pertencente ao fenómeno de *snap-back*, para uma melhor compreensão deste fenómeno descrevem-se as curvas analíticas deslizamento vs. comprimento colado, extensão vs. comprimento colado e tensão de aderência vs. comprimento colado, correspondentes a este ponto e aos outros pontos assinalados na curva força vs. deslizamento da Figura 6.49.

Verifica-se na Figura 6.50 que a curva deslizamento vs. L_b correspondente ao ponto E intersecta a curva deslizamento vs. L_b correspondente ao ponto D, i.e., os deslizamentos relativos ao ponto E na extremidade carregada são inferiores aos deslizamentos correspondentes ao ponto D, verificando-se assim o *snap-back* referido. Posteriormente, existe um valor de deslizamentos comum entre as duas curvas (Ponto D e E) a partir do qual os deslizamentos do ponto E são superiores aos do ponto D.

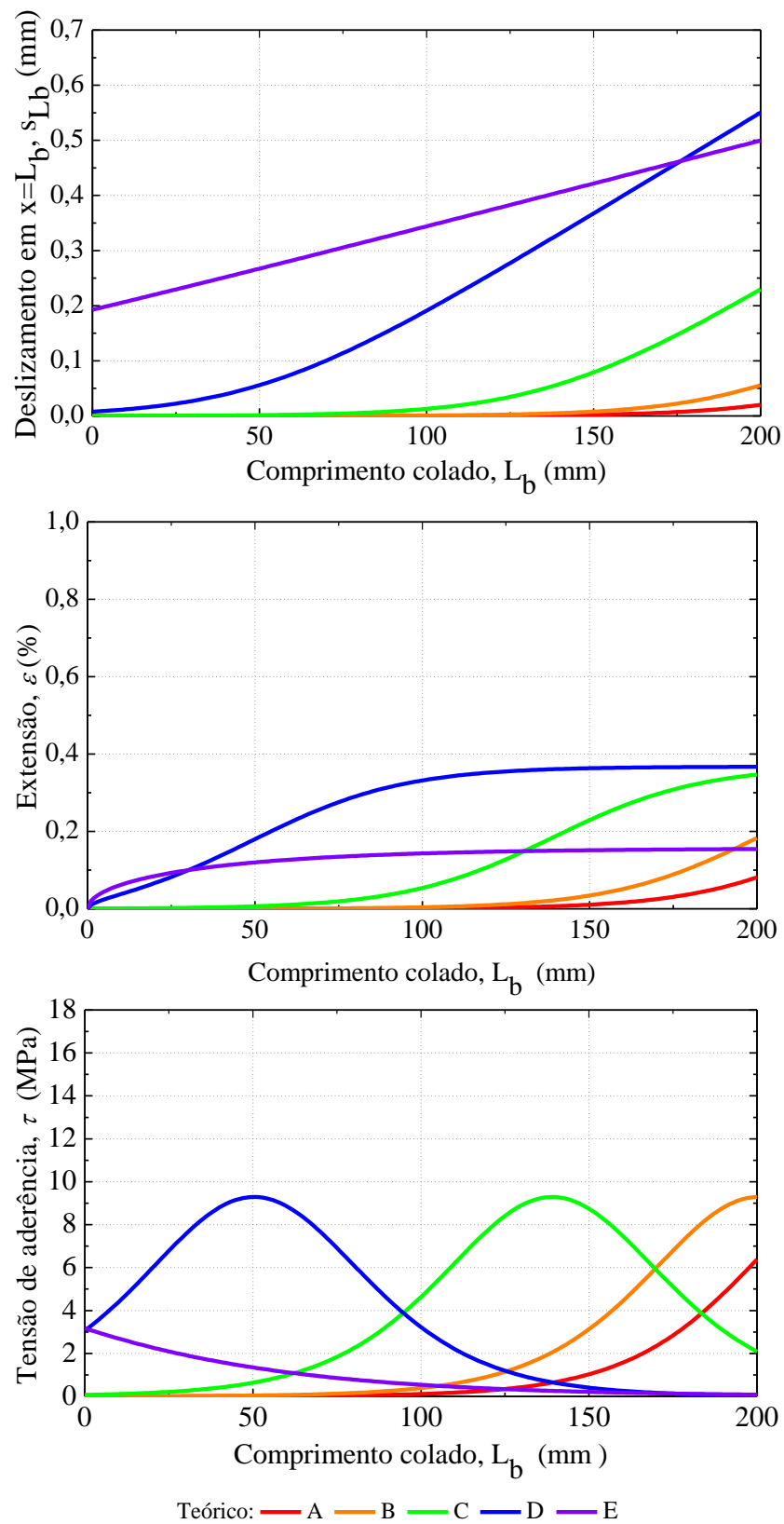


Figura 6.50 - Distribuição de deslizamentos, extensões e tensões e ao longo do comprimento colado de 200 mm sem ancoragem mecânica.

Capítulo 7

Conclusões e desenvolvimentos futuros

Ao longo do presente capítulo serão sintetizadas algumas conclusões que se podem retirar dos trabalhos realizados durante o desenvolvimento da presente dissertação. São ainda apresentados alguns aspetos que podem ser considerados para possíveis estudos futuros relacionados com o desempenho de ligações adesivas CFRP/aço.

7.1. Conclusões

O modelo analítico apresentado é baseado num modelo de *bond-slip* exponencial e descreve as soluções analíticas para o desempenho do deslizamento da ligação FRP/aço com e sem um sistema de ancoragem mecânica. Os resultados analisados e apresentados nesta dissertação permitem retirar as conclusões seguintes:

Na ligação FRP/aço sem ancoragem mecânica, o pós-colapso da ligação é caracterizado por um fenómeno *snap-back* que é identificado pelo modelo analítico não linear proposto. Este fenómeno é identificável pelas curvas extensão vs. deslizamento (e força vs. deslizamento), nas curvas deslizamento vs. comprimento colado e extensão vs. comprimento colado.

Para o sistema EBR sem ancoragem mecânica concluiu-se que quanto maior é o comprimento colado maior é a força transmitida ao compósito de FRP. Contudo quando o comprimento colado é superior ao comprimento efetivo, a força transmitida ao compósito de FRP torna-se constante. O mesmo já não se verifica para o sistema EBR com ancoragem mecânica uma vez que a força transmitida ao compósito de CFRP aumenta sempre para qualquer comprimento colado até à força de rotura do FRP.

O modelo analítico não linear proposto foi comparado com outros resultados numéricos e experimentais encontrados na literatura. Apesar da ausência de resultados numéricos e experimentais utilizando o modelo *bond-slip* exponencial usado no presente trabalho, os resultados analíticos foram comparados com outros estudos onde a fórmula de Popovics [37] foi assumida.

Desta análise, pode-se concluir que os resultados analíticos ajustaram-se muito bem aos experimentais e numéricos encontrados na literatura com e sem a ancoragem mecânica.

Relativamente aos modos de rotura, a técnica EBR sem ancoragem mecânica conduziu quase sempre a roturas pela ligação adesiva FRP/aço. A rotura da ligação CFRP/aço ocorreu para 38% da rotura do compósito de CFRP o que evidencia a pouca eficiência deste tipo de técnica.

Porém, assumindo que os deslizamentos na extremidade oposta à extremidade carregada são nulos, devido à utilização de uma ancoragem mecânica, o desempenho da ligação apresenta um melhoramento significativo. Conseguindo-se, inclusivamente levar o CFRP até à rotura. Conclui-se assim que sempre que possível, deve usar-se ancoragens mecânicas para melhor desempenho da ligação CFRP/aço.

7.2.Futuros desenvolvimentos

No trabalho desenvolvido foram cumpridos, de uma forma geral, os objetivos propostos inicialmente. Assim, possíveis desenvolvimentos futuros ou sugestões de trabalhos a desenvolver são mencionados a seguir.

Realizar ensaios de corte simples para sistemas de EBR, com e sem ancoragem mecânica, quando a ligação FRP/aço estiver sujeita a uma determinada temperatura alta e também, quando esta variar;

Realizar ensaios de corte simples com variação de largura do compósito de FRP ao longo do comprimento e ainda adicionar uma ancoragem mecânica. Com finalidade de aumentar a força de rotura da ligação CFRP/aço.

Aprofundar mais a técnica EBR com ancoragem mecânica realizando mais ensaios de corte simples, pois os ensaios realizados nesta dissertação foram reduzidos e 50% deles não correram como esperado, não analisando tudo o que era pretendido.

Bibliografia

- [1] Lucas, D.: "Degradação da resistência mecânica de vigas reforçadas com GFRP", Dissertação para obtenção do grau de Mestre, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, 2006.
- [2] X. Jiang, M.H. Kolstein, F.S.K. Bijlaard: "Study on mechanical behaviors of FRP-to-steel adhesively-bonded joint under tensile loading" *Composite Structures* 98 (2013) 192–201.
- [3] Juvandes, L. (2002), Reforço e Reabilitação de Estruturas - Módulo 2, Formação Profissional - Ordem dos Engenheiros - Secção Regional da Madeira, dias 5-6 de Abril de 2002.
- [4] Täljsten, B. (2005), The Importance of Bonding – an historic overview and future possibilities, *Proceedings of the International Symposium on Bond Behaviour of FRP in Structures*, Chen and Teng (eds)
- [5] Yang, Y; Yue Q.; Peng, F. (2005), Experimental research on bond behaviour of CFRP to steel, *Proceedings of the International Symposium on Bond Behaviour of FRP in Structures*, Chen and Teng (eds)
- [6] Kanakubo T. Wu Z.S. e Ueda T. "Influence of local bond characteristics in FRP-concrete bond behavior." 11th International Conference on Fracture, 2005, Turin, Italy, March 20-25.
- [7] Vallee T, Correia JR, Keller T. Probabilistic strength prediction for double lap joints composed of pultruded GFRP profiles – Part II: strength prediction. *Compos Sci Technol* 2006;66:1915–30.
- [8] Dimande A. "Influência da interface no reforço à flexão de estruturas de betão com sistemas de FRP." , 2003, Tese Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal.
- [9] Dai, J, Ueda, T and Sato, Y. Unified analytical approaches for determining shear bond characteristics of FRP-concrete interfaces through pullout tests. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 2006; 4(1):133-145.
- [10] Schnersch, D.; Stanford, K.; Sumner, E.; Rizkalla S. (2005), Bond behavior of CFRP strengthened steel bridges and structures, *Proceedings of the International Symposium on Bond Behaviour of FRP in Structures*, Chen and Teng.
- [11] Biscaia, HC. Behaviour and modelling of GFRP-to-concrete interfaces of reinforced concrete elements exposed to aggressive environments. PhD Thesis, Faculty of Science and Technology, Nova University of Lisbon, 2012. [In Portuguese].
- [12] Ferrari, V, Padaratz, I and Loriggio, D. Reforço à flexão de vigas de concreto armado com manta de fibra de carbono: mecanismos de incremento de ancoragem. *Acta Scientiarum*, Maringá, 2002; 24(6):1783-1791.
- [13] Travassos, N. Caracterização do comportamento da ligação CFRP com o betão. MSc Thesis, Instituto Superior Técnico, 2004.
- [14] Martinelli, E, Napoli, A, Nunziata, B and Realfonzo, R. Inverse identification of a bearing-stress-interface-slip relationship in mechanically fastened FRP laminates. *Composite Structures*, 2012, 94(8):2548-2560.
- [15] Realfonzo, R, Martinelli, E, Napoli, A and Nunziata, B. Experimental investigation of the mechanical connection between FRP laminates and concrete. *Composites Part B: Engineering*, 2013, 45(1):341-355.
- [16] Grelle, SV and Sneed, LH. Review of anchorage systems of externally bonded FRP es. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 2013, 7(1):17-33.

- [17] Breña, SF and McGuirk, GN. Advances on the behavior characterization of FRP-anchored carbon fiber-reinforced polymer (CFRP) sheets used to strengthen concrete elements. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 2013;7(1):3-16.
- [18] Mendes, RMV. CFRP strip anchorage systems to reinforced concrete elements. MSc Thesis, Instituto Superior Técnico, 2008. (in portuguese).
- [19] Biscaia, HC, Micaelo, R, Teixeira, J and Chastre, C. Delamination process analysis of FRP-to-parent material bonded joints with and without anchorage systems using the Distinct Element Method. *Composite Structures*, 2014; 116:104-119.
- [20] Biscaia, HC, Micaelo, R, Teixeira, J and Chastre, C. Numerical Analysis of FRP anchorage zones with variable width. *Composites Part B: Engineering*, 2014; 67:410-426.
- [21] Matthys, S. Structural behaviour and design of concrete members strengthened with externally bonded FRP reinforcement. PhD Thesis, Ghent University, Faculty of Applied Sciences Department of Structural Engineering, Academic year 1999-2000.
- [22] Ferracuti, B. Strengthening of RC structures by FRP: Experimental analyses and numerical modelling. PhD Thesis, Università degli Studi di Bologna, Italy, 2006.
- [23] Nakaba, K, Kanakubo, T, Furuta, T and Yoshizawa, H. Bond behavior between fiber-reinforced polymer laminates and concrete. *ACI Structural*, 2001;98(3):359-367.
- [24] Biscaia, HC, Chastre, C and Silva, MAG. Nonlinear numerical analysis of the debonding failure process of FRP-to-concrete interfaces. *Composites Part B: Engineering*, 2013; 50:210-223.
- [25] Carrara, P, Ferretti, D, Freddi, F and Rosati, G. Shear tests of carbon fiber plates bonded to concrete with control of snap-back. *Engineering Fracture Mechanics*, 2011; 78:2663-2678
- [26] Dehghani, E, Daneshjoo, F, Aghakouchak, AA and Khaji, N. A new bond-slip model for adhesive in CFRP-steel composite systems. *Engineering Structures*, 2012;34:447-454.
- [27] Xia, SH and Teng, JG. Behaviour of FRP-to-steel bonded joints. *Proceedings of the International Symposium on Bond Behaviour of FRP in Structures*, Hong Kong, 2005.
- [28] Biscaia, HC, Chastre, C and Silva, MAG. Linear and nonlinear analysis of bond-slip models for interfaces between FRP composites and concrete. *Composites Part B: Engineering*, 2013;45(1):1554-1568.
- [29] Dai J, Ueda T, Sato Y. Development of the nonlinear bond stress-slip model of fiber reinforced plastics sheet-concrete interfaces with a simple method. *Journal of Composites for Construction*, 2005;9(1):52-62.
- [30] Teng, JG, Lu, XZ, Ye, LP and Jiang, JJ. Bond-slip models for interfaces between externally bonded FRP and concrete. *FRP Composites in Civil Engineering - CICE 2004*, pp.55-68.
- [31] Teng, JG; Yuan, H and Chen, JF. FRP-to-concrete interfaces between two adjacent cracks: Theoretical model for debonding failure. *International Journal of Solids and Structures*, 2006; 43:5750-5778.
- [32] Freddi, F and Savoia, M. Analysis of FRP-concrete debonding via boundary integral equations. *Engineering Fracture Mechanics*. 2008; 75:1666-1683.
- [33] Cornetti, P and Carpinteri, A. Modelling the FRP-concrete delamination by means of an exponential softening law. 2011; 33(6):1988-2001.
- [34] Viegas, A. Modelação de ligações adesivas no reforço de estruturas. MSc Thesis, Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa, 2014.
- [35] Biscaia, HC, Chastre, C and Viegas, A. A new discrete method to model FRP-to-parent material bonded joints. *Composite Structures*, 2015; 121:280-295.
- [36] Teixeira, J. Modelação de elementos de betão reforçados com compósitos de FRP recorrendo ao Método de Elementos Discretos, Faculdade de Ciências e Tecnologias, Universidade Nova de Lisboa, 2014.
- [37] Popovics S. A numerical approach to the complete concrete stress-strain relation for concrete. *Cement and Concrete Research*, 1973; 3(5):583-599.
- [38] Chajes, MJ, Finch, WW, Januska, TF, Thomson, TA. Bond and force transfer of composite material plates bonded to concrete. *ACI Structural Journal*, 1996; 93:208-217.
- [39] Yuan, H, Teng, JG, Seracino, Wu, ZS and Yao, J. Full-range behavior of FRP-to-concrete bonded joints. *Engineering Structures*, 2004; 26(5):553-565.

- [40] Caggiano, A, Martinelli, E and Faella, C. A fully-analytical approach for modelling the response of FRP plates bonded to a brittle substrate. *International Journal of Solids and Structures*, 2012; 49:2291-2300.
- [41] Dai, J, Ueda, T and Sato, Y. Unified analytical approaches for determining shear bond characteristics of FRP-concrete interfaces through pullout tests. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 2006; 4(1):133-145.
- [42] Mazzotti, C, Savoia, M and Ferracuti, B. A new single-shear set-up for stable debonding of FRP-concrete joints. *Construction and Building Materials*, 2009; 23(4):1529-1537.
- [43] Juvandes, L.: “Materiais compósitos reforçados com fibras, FRP”, projecto elaborado para o departamento de Engenharia Civil, Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2002.
- [44] Ueda T. e Dai J. G.: “Interface bond between FRP sheets and concrete substrates-properties, numerical modelling and roles in member behaviours.” *Progress in Structural Engineering and Materials*. 2005, 7(1): 27-43.
- [45] Biscaia, H.: “Rotura por perda de aderência entre reforços poliméricos com fibras de vidro e elementos estruturais de betão”, Dissertação para obtenção do grau de Mestre, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, 2006.
- [46] Artigo interno: Biscaia, Borba, Silva, Chastre, Nonlinear theoretical model to predict the full-range debonding process of FRP-to-parent material interfaces. Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, 2015.
- [47] Biscaia, HC, Silva, MAG and Chastre, C. Factors influencing the performance of externally bonded reinforcement systems of GFRP-to-concrete interfaces. *Materials and Structures*. DOI: 10.1617/s11527-014-0370-z
- [48] Sena-Cruz, JM and Barros, JAO. Bond between Near-Surface Mounted Carbon-Fiber-Reinforced Polymer laminate strips and concrete. *Journal of Composites for Construction*, 2004; 8(6):519-527.
- [49] P. Cornetti e A. Carpinter: “Modelling the FRP-concrete delamination by means of an exponential softening law.” *Engineering Structures*. 2011, Vol. 33: 1988–2001.
- [50] Ferracuti B., Savoia M. e Mazzotti C.:” Interface law for FRP-concrete delamination”. *Composite structures*, 2007, Vol. 80: 523-531.
- [51] Chastre Rodrigues C. “Comportamento da ligação aço-resina-betão em elementos estruturais”, 1993, Dissertação de mestrado realizado no Instituto Superior Técnico: Lisboa, Portugal.
- [52] Marta B., Lluís T., Albert T. e Cristina B.: “Experimental study of bond behaviour between concrete and FRP bars using a pull-out test”, *Composites Part B: Engineering*, 2009, Vol. 40:784-797.
- [53] Tamon U. e Jianguo D.: “Interface bond between FRP sheets and concrete substrates: properties, numerical modeling and roles in member behaviour”, *Progress in Structural Engineering and Materials*, 2005, Vol.7: 27-43.
- [54] Faella C., Martinelli E. e Nigro E.: “Debonding failure in FRP-strengthened RC beams: a model-based approach”. *Asia-Pacific Conference on FRP in Structures (APFIS 2007)*.
- [55] Achillides Z. e Pilakoutas K.: “Bond behavior of fiber reinforced polymer bars under direct pullout conditions”. *Journal of Composites for Construction*, 2004, 8(2): 173-181.
- [56] Fédération Internationale du Béton (FIB): Bulletin d’information n. 14. ”Externally bonded FRP reinforcement for RC structures.” July, 2001.
- [57] ACI Committee 440. “Guide for design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures.” American Concrete Institute, ACI 440.2R-02, 2002, Farmington Hills, MI, USA.
- [58] Neubauer, U, Rostásy, FS. Design aspects of concrete structures strengthened with externally bonded CFRP-plates. In: *Proceedings of the 7th international conference on structural faults and repairs*, 1997, 2:109-18.
- [59] Teng JG, Chen JF, Smith ST, Lam L. FRP strengthened RC structures. Chichester (England): John Wiley and Sons Ltd.; 2001.
- [60] Carvalho, TS. Reforço à flexão de vigas de betão armado com compósitos de CFRP, Faculdade de Ciências e Tecnologias, 2010.

- [61] Hassan, T.; Rizkalla, S., Investigation of bond in concrete structures strengthened with near surface mounted carbon fiber reinforced polymer strips, *Journal of composites for construction*, Volume 7, Issue 3, pp. 248 – 257, Agosto 2003
- [62] T. Yu, D. Fernando, J. G. Teng, X. L. Zhao, Experimental study on CFRP-to-steel bonded interface, *Progress in Strutural Engineering and Materials*. 2012
- [63] CNR_DT 200/2004, Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening existing structures, materials, RC and PC structures, masonry structures.
- [64] Carrara, P, Ferretti, D, Freddi, F and Rosati, G. Shear tests of carbon fiber plates bonded to concrete with control of snap-back. *Engineering Fracture Mechanics*, 2011; 78:2663-2678